

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Б. П. КОНСТАНТИНОВА**

УДК 621.317.799:681.325

На правах рукописи

**Трофимов Виктор Алексеевич**

**Электронные средства автоматизации криогенных  
установок в ядерно-физических экспериментах**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Гатчина-2006**

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН.

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук А. А. Васильев,

доктор технических наук Н. Н. Чернов.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Краснов Л. В.,

кандидат физико-математических наук, доцент Гребенщиков В. В.

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет).

Защита состоится "1" февраля 2007 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д-002.115.01 в Петербургском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН по адресу:

188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща, ПИЯФ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан "28" декабря 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

И.А. Митропольский

## **1. Общая характеристика работы.**

Работа посвящена созданию и применению электронных средств автоматизации криогенных установок в ядерно-физических экспериментах на пучках заряженных частиц в ПИЯФ РАН; PSI (Paul Scherrer Institute), Швейцария; COSY<sup>1</sup>, Германия в 1979-2006 годах.

**Актуальность темы.** Значительное число экспериментов на пучках заряженных частиц проводится с использованием криогенных установок. Криогенные температуры позволяют получать специфическое квантовое состояние вещества (ядерная поляризация) и увеличивать плотность ядерных мишеней, что приводит к быстрому набору статистики. Работа водородных и дейтериевых пузырьковых камер была вообще немыслима без использования криогенных температур.

- Криогенные установки позволяют создавать сильные магнитные поля за счёт использования эффекта сверхпроводимости.
- Криогенные установки необходимы для создания многих типов мишеней для экспериментов на пучках заряженных частиц.
- Криогенные установки часто применяются при создании рециркуляционных газовых систем и систем высокой и сверхвысокой очистки газов.
- Криогенные установки широко используются при разделении изотопов.

Часто криогенные установки представляют собой сложные и дорогостоящие системы, для нормальной работы которых необходимо измерение и регулирование большого числа параметров, таких как температура, давление и расход газов, уровень жидкости. Для автоматизации работы таких систем необходимо создание электронных устройств преобразования, обработки и регулирования перечисленных параметров.

Круглосуточная работа на ускорителях и высокая стоимость ускорительного времени определяют требования к системам управления криогенными установками: системы управления должны работать в полностью автоматическом режиме и все основные параметры установки должны записываться параллельно с общим потоком физических данных. Автоматизация необходима и для исключения пресловутого «человеческого фактора».

Зачастую в установках используются приборы самых разных типов, поэтому актуальной является также задача унификации электрических сиг-

---

<sup>1</sup> COoler SYnchrotron, Forschungszentrum Jülich, Germany.

налов с различных приборов при построении из них общей контрольно-измерительной системы установки.

**Целью работы** является разработка новых методов измерений в физических экспериментах с использованием криогенных установок

1. Повышение точности измерения координат треков заряженных частиц и эффективности работы пузырьковой водородно-дейтериевой камеры.
2. Разработка и создание экспериментальных криогенных систем, необходимых для исследования основных параметров мюонного катализа на базе ионизационной камеры высокого давления.
3. Разработка метода и создание установки по получению сверхчистого водорода для проведения экспериментов по изучению захвата мюона протоном.
4. Разработка метода и создание установки для исследования ядерной поляризации в молекулах водорода и дейтерия.
5. Разработка метода и создание приборов для неразрушающего контроля профиля: температур и скоростей в потоке газа или жидкости, атомарных пучков водорода и дейтерия, границы раздела жидкость-газ.

Для решения перечисленных задач были разработаны и созданы автоматизированные системы управления пузырьковой камерой, криогенной ионизационной камерой, криоциркуляционной установкой получения сверхчистого водорода.

#### **Научная новизна**

1. Создана новая комплексная система управления пузырьковой камерой, позволившая существенно улучшить качество и точность экспериментальных результатов, в результате чего получена рекордная для пузырьковых камер статистика (8356 событий в эксперименте по исследованию pp-рассеяния и 6032 событий в эксперименте по пр-рассеянию) при различных энергиях.
2. Разработанные системы газо- и криообеспечения позволили измерить рекордные по точности температурные зависимости скорости  $d\mu$ -синтеза и скорости переворота спина в  $\mu d$ -атоме  $\lambda_{3/2 \rightarrow 1/2}$ .
3. Предложен метод получения сверхчистого водорода с рекордно малым количеством примесей (менее  $10^{-8}$ ), на основе которого создана криоциркуляционная установка для эксперимента по исследованию захвата мюона протоном ( $\mu$ Cap).
4. Разработан метод и создан ряд приборов на основе проволочного детектора, позволяющие проводить измерения:
  - а. топографии температурных полей и полей скоростей газов и непроявляющихся жидкостей;

- б. профиля плотности атомарных пучков по теплоте рекомбинации атомов;
  - в. уровня непроводящих, в том числе криогенных, жидкостей в режиме непрерывного уровнемера.
5. Впервые разработана и создана вне ускорительных систем автоматизированная установка по исследованию ядерной поляризации молекул, образованных из поляризованных атомов и факторов деполяризации атомарных пучков в накопительных ячейках.

#### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

Практическая ценность заключается в том, что, во-первых, созданная автоматизированная система управления пузырьковой камерой позволила на 38% увеличить эффективность использования ускорительного времени. Во-вторых, разработанные и созданные для эксперимента  $\mu$ -катализа автоматизированные установки крио- и газообеспечения позволили получить физические результаты с рекордным разрешением по температуре. В третьих, создан и использован в физических экспериментах класс новых приборов для исследования профиля температур и скоростей газовых и атомарных потоков. Создан новый непрерывный уровнемер для непроводящих жидкостей. В четвёртых, разработанная и созданная автоматизированная рециркуляционная система получения сверхчистого водорода сделала возможным проведение эксперимента по захвату мюона протоном. Используемый в установке принцип получения сверхчистого водорода может быть использован в любых физических установках, где необходим сверхчистый водород. В пятых, созданная автоматизированная установка CELGAS по исследованию поляризации молекул и факторов деполяризации атомов позволяет определить пути повышения плотности поляризованных мишеней и, следовательно, статистики без использования дорогостоящих экспериментов на ускорителях.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

- Proceedings of simposium on nucleon-nucleon and hadron-nuclear interaction in intermedia energy region. Leningrad, 1986.
- Всесоюзная конференции "Криогеника- 87", июнь 1987, г. Москва.
- Международная конференция "Криогеника-90", Кошице, Чехословакия, 1990.
- Cryogenics conference proceedings, Prague, 2004.
- NHA Annual Hydrogen Conference 2005, Washington, DC, USA.
- German Physical Society Meeting 2005, Berlin.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, 72 рисунков и списка литературы. Общий объем диссертации 146 страниц.

## **Краткое содержание диссертации**

**Введение** содержит формулировку основной цели работы и ее актуальность.

**Первая глава** посвящена автоматизации работы пузырьковой водородно-дейтериевой камеры. В рамках этой работы разработаны новые, более качественные электронные адаптеры основных устройств камеры:

- электронная система стабилизации температурного режима камеры на уровне 28К с точностью не хуже  $\pm 0.03\text{К}$ ,
- высокостабильная система управления поршневым расширительным устройством,
- мощный блок питания электропривода фотоаппарата (500Вт) с широтно-импульсным управлением от ЭВМ,
- адаптер измерения изменения давления в камере под воздействием расширительного устройства,
- оптоволоконная система наблюдения рабочей зоны камеры в условиях сильного магнитного поля (1.5 Тл),
- накопительная система поджига лампы- вспышки.

Автоматизация работы камеры реализована на базе информационно-вычислительного комплекса ИВК-1 и набора стандартных модулей КАМАК. Аппаратная и программная части системы автоматизации организованы по модульному принципу, каждый модуль структуры отвечает за работу определённого узла камеры. Сделан автоматический мониторинг вакуумной системы камеры и системы контроля токов шунтов и магнитных полей магнитов тракта пучка и самой камеры. Программы нижнего уровня, работающие непосредственно с модулями КАМАК, выполнены на макроасемблере MACRO 2. Обработка информации и интерфейсные программы написаны на Фортране под управлением операционной системы RSX11M.

Повышение стабильности и оптимизация параметров (кривая расширения, давление, температура, время срабатывания вспышки и стереофотоаппарата) улучшили качество фильмового материала на 38% (по результатам двух последних экспериментов) и, следовательно, более эффективно использованию ускорительного времени. Данная работа позволила произвести около миллиона качественных кадров в экспериментах по pp- и

пр- рассеянию с максимально эффективным использованием ускорительного времени.

**Вторая глава** посвящена разработке и созданию электронных средств регулирования для экспериментов по исследованию  $d\mu$ - и  $dd\mu$ -катализа. В отсутствие мюонов реакции синтеза, например, ядер дейтерия  $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$  или ядер дейтерия и трития  $d+t \rightarrow {}^3\text{He}+n$  происходят с заметной вероятностью лишь при высоких энергиях сталкивающихся частиц,  $E > 10$  кэВ, т. е. при температурах в десятки и сотни миллионов градусов, поскольку ядрам нужно путём туннельного перехода преодолеть высокий барьер кулоновского отталкивания, чтобы сблизиться до расстояния ядерных взаимодействий ( $r_N \sim 5 \times 10^{-13}$  см). Мюонный катализ – явление синтеза (слияния) ядер изотопов водорода, происходящее при участии отрицательно заряженных мюонов. При торможении отрицательно заряженных мюонов в плотной смеси изотопов водорода за время  $10^{-12}$  с. образуются мюонные атомы  $\mu$ ,  $d\mu$ , и  $t\mu$ . Из-за малых размеров и электронейтральности мезоатомы водорода ведут себя подобно нейтронам: они свободно проникают сквозь электронные оболочки атомов и подходят на близкие расстояния к их ядрам. При этом происходят многообразные  $\mu$ -атомные и  $\mu$ -молекулярные процессы: перехват мюонов ядрами более тяжёлых изотопов; образование мюонных молекул и т. д. Образование мюонных молекул является решающим условием протекания мюонного катализа.

Для исследования  $dd\mu$  и  $d\mu$ -катализа в ПИЯФ была использована специально разработанная ионизационная камера высокого давления (ИК) с давлением до 120 атм. Ионизационная камера представляет собой активную мишень –  $4\pi$ -детектор – с близкой к 100% эффективностью регистрации заряженных частиц. Детальные измерения температурной зависимости скорости  $dd\mu$ -катализа позволяют исследовать механизм резонансного образования мезомолекул, обязанный существованию слабосвязанного уровня  $E_{II}$ . Такие измерения являются наиболее точным экспериментальным способом определения значения этого уровня, ввиду сильной зависимости скорости катализа  $\lambda_{dd\mu}(T)$  от энергии  $|E_{II}|$ .

Для работы камеры была разработана и создана установка газонаполнения, регулирования температуры и очистки камеры. Поскольку одним из рабочих газов являлся радиоактивный газ тритий, нужно было соблюдать специальные требования техники безопасности. Основное требование – это по возможности кратковременное пребывание персонала в помещении, где находится система газонаполнения и сама ионизационная камера. Была создана система дистанционного контроля основных параметров и дистанционного управления наполнения ИК тритием. Тритием ИК заполняется из специальных контейнеров с пористым или порошковым титаном, который

хорошо адсорбирует тритий. Выделение трития из титана происходит при нагреве контейнера до температуры около 400 °С. Дистанционный контроль величины давления осуществляется с помощью авиационных малогабаритных потенциометрических датчиков давления типа ДМП с классом точности 2.5 %. Температура контейнеров с тритием и корпуса ИК измерялась кабельными термопарами в оболочке из нержавеющей стали с градуировкой типа ХА. Питание нагревателей (потребляемая мощность ~ 1кВт) осуществлялось от специально разработанных тиристорных источников питания ИПТ-2, мощностью до 2 кВт каждый. “Холодные” концы термопар были помещены в термостат при температуре +35 °С с точностью поддержания  $\pm 0.03$  °С. Сигналы с термопар и датчиков давления усиливались и преобразовывались в частотные сигналы в восьмиканальном блоке (усилитель+ПНЧ). Частотные сигналы транслировались в измерительный зал и вводились в ЭВМ. Точность измерения температуры контейнеров и камеры – не хуже  $\pm 1$  °С .

На этой камере была исследована температурная зависимость основных параметров мюонного катализа в  $dd\mu$ - и  $dt\mu$ - смесях в диапазоне температур от комнатной до 400К. Для следующей, криогенной ионизационной камеры (КИК) дополнительно к системе газообеспечения была разработана и создана криогенная система охлаждения. Интервал рабочих температур составил  $30 \div 300$ К с точностью поддержания температуры  $\pm 0.05$ К и абсолютной точностью измерения  $\pm 0.1$ К. Криогенные платиновые термометры сопротивления (100 Ом) калибровались по давлению насыщенных паров Ne, Ar, Xe, Cr, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Для калибровки датчиков был разработан и использован специальный четырёхканальный электронный модуль, каждый канал которого состоял из прецизионного источника тока (1мкА  $\div$  1А) и прецизионного инструментального усилителя. Такой же модуль был использован при построении системы регулирования температуры КИК. Первый вариант системы терморегулирования КИК для работы на пучке ПИЯФ был реализован на базе микропроцессора КР580. В качестве аналого-цифрового преобразователя использовался цифровой вольтметр. Высокий уровень электромагнитных помех между “землями” экспериментального и измерительного залов ускорителя не позволял передавать соответствующие температуре аналоговые сигналы с минимальными искажениями. Было признано целесообразным использовать гальваническую развязку сигналов между экспериментальным и измерительным залами.

Была разработана и использована измерительная система с распределённым аналого-цифровым преобразованием. Первая стадия преобразования аналого- частота (ПНЧ) может быть легко соединена с помощью гальванической развязки с преобразователем частота – цифровой код. Именно с этой целью в качестве первичного преобразователя аналогового сигнала была выбрана дешёвая и качественная микросхема ADFC32 фирмы Analog



Devices. Преобразователь частота– код построен на 16 разрядных таймерах, вместе с параллельными регистрами, расположенными на вставляемой в персональный компьютер плате. Все измерительные каналы прокалиброваны с помощью магазина сопротивлений P327 класса 0.01%, образцового вольтметра Ц31 класса 0.005% и частотомера ЧЗ-34. Общий баланс погрешностей измерительного тракта составил не более 0.051%. Для повышения точности температурный диапазон 30 ÷ 300К разбит на два поддиапазона, первый 30÷80К и второй 80÷300К. В первом поддиапазоне датчик температуры питается током 2мА, во втором – 1мА. Кроме того, для использования полного динамического диапазона системы ПНЧ-Таймер в каждом поддиапазоне используется разный коэффициент усиления усилителя. В этом случае абсолютная ошибка измерения температуры для первого поддиапазона составляет 0.08К, для второго – 0.07К. В результате получена абсолютная точность измерений температуры в диапазоне 30÷300 К не хуже  $\pm 0.1$  К.

**Третья глава** посвящена разработке и созданию принципиально новых приборов для неразрушающего контроля профиля температур и скоростей газовых и жидкостных потоков, исследования профиля атомарных потоков, измерения уровня непроводящих, в том числе криогенных жидкостей.

Для определения эффективности работы разного рода теплообменников необходимо измерять профиль температур и скоростей в потоке газа или жидкости. Делается это, как правило, двумя способами:

1. необходимое количество температурных датчиков располагается вместе со жгутами проводов в потоке;
2. один или несколько датчиков располагаются на штанге, которая перемещается в плоскости, перпендикулярной потоку;

В первом случае необходимое количество датчиков со жгутами сильно искажает поток, во втором необходима механическая система перемещения, которая также искажает поток и из-за своей инерционности пригодна только для исследования установившихся потоков.

Созданный нами прибор для измерения топографии температурного поля и поля скоростей в сечении газового потока представляет собой рамку из стеклотекстолита, на которой расположена двумерная сетка распределенных термопреобразователей – вольфрамовых проволочек диаметром 0.02 мм. На стеклотекстолитовой рамке, используемой также в качестве печатной платы, монтируются:

1. измерительный усилитель, подключаемый к потенциальным концам проволочек с помощью коммутатора;
2. два управляемых от ЭВМ источника тока;
3. 40-канальные коммутаторы для подачи тока на нужную проволоку и подключения измерительного усилителя и цифрового вольтметра

для измерения падения напряжения на данной проволоке. Величина падения напряжения с вольтметра передается модулем интерфейса КОП в ИВМ РС. Ниже кратко сформулированы принципы построения математической модели монитора.

Исходными для восстановления температуры в системе являются сопротивления проволок. Падение напряжения на проволоках монитора в случае малого тока (не изменяющего температуру нити) пропорционально температуре обдуваемого газа, а в случае большого тока (разогревающего нить) является функцией скорости потока обдуваемого газа. На этом принципе построено измерение профиля температур и профиля скоростей потока газа. Налагается ограничение на рельефность поля температур, связывающее величину максимально возможной рельефности с числом проволок. Рельефность поля температур, т.е. отношение максимальной температуры к средней, не должна превышать квадратного корня из числа проволок. Найденное поле средних (в прямоугольниках на узлах – пересечении проволок) температур позволяет построить непрерывное распределение  $T(x, y)$  экстраполяционными методиками так, чтобы обеспечивались непрерывность функции  $T(x, y)$  и производных  $\partial T(x, y) / \partial x, \partial T(x, y) / \partial y$  на границах прямоугольников и условие

$$T_{ij} = \frac{1}{\Delta x} \cdot \int_{x_{ij} - \frac{\Delta x}{2}}^{x_{ij} + \frac{\Delta x}{2}} T(x, y) \cdot dx, \quad T_{ij} = \frac{1}{\Delta y} \cdot \int_{y_{ij} - \frac{\Delta y}{2}}^{y_{ij} + \frac{\Delta y}{2}} T(x, y) \cdot dy,$$

$$\lim_{Y \rightarrow Y_{ij}} (T(x_{ij}, y)) = \lim_{X \rightarrow X_{ij}} (T(x, y_{ij})),$$

Полный профиль восстанавливается с помощью математической обработки на персональном компьютере. В режиме термоанемометра в поток газа вносится дополнительная мощность  $Q = R \cdot I^2 \approx 300 \text{ м} (80 \cdot 10^{-3} \text{ А})^2 \approx 0.2 \text{ Вт}$ , что, естественно, не изменяет температуру потока. В режиме измерения поля температур в поток вносится не более 0.002 Вт дополнительной мощности. Прибор калибровался с помощью промышленного термоанемометра ТА-8М. В результате погрешность измерения температуры в узлах проволочной решетки не превышает 4% в диапазоне температур  $0 \div 60^\circ \text{ С}$ . Прибор в режиме термоанемометра позволяет измерять скорость воздушного потока от 0.1 до 5 м/с с погрешностью  $\pm 15\%$ . Особенности данного прибора:

1. малое аэродинамическое сопротивление;
2. возможность измерения мгновенного профиля температур или скоростей потока;

3. возможность исследования распределения температур или скоростей потока на любой поверхности (цилиндрическая, сферическая, любая криволинейная);
4. отсутствие подвижных элементов;
5. использование в качестве распределенных датчиков температуры любых проволок, имеющих достаточно большой температурный коэффициент сопротивления (вольфрам, молибден, платина, никель и др.).

Профиль атомарного пучка в области его формирования является одной из основных характеристик источника поляризованных атомов водорода (дейтерия). Традиционный метод измерения профиля водородного атомарного пучка основан на использовании квадрупольного масс-спектрометра (к.м.с.), в котором атомы проходят сквозь спектрометр и пересекаются внутренним электронным пучком. К.м.с. располагается на двухкоординатном столе, что позволяет перемещать его в плоскости, перпендикулярной пучку. Непрямой метод измерения профиля пучка связан с использованием компрессионной трубки и основан на измерении давления в объеме с компрессионной трубкой. Главные ограничения этих методов: разрушение пучка измерительным прибором, механическая сложность двухкоординатного перемещения в вакууме, высокие требования к вакууму при измерениях с к.м.с.

Двухкоординатный микропроволочный детектор атомарного пучка позволяет преодолеть эти ограничения. Работа прибора основана на изменении сопротивления тонкой проволоки в потоке атомарного водорода (дейтерия). Атомы водорода нагревают поверхность из-за поверхностной рекомбинации в молекулы, в результате изменяется температура проволоки и, соответственно, ее сопротивление. Таким образом, сопротивление проволоки несет в себе информацию о величине потока. Если организовать двумерную сетку проволок, то можно восстанавливать профиль атомарного пучка. Математическая модель нагрева проволоки вследствие рекомбинации атомарного водорода на ее поверхности строилась в предположении однородного параллельного атомарного пучка, падающего на проволоку с круглым сечением, длина которой много больше диаметра. В результате получено нелинейное стационарное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$-\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \left[ \frac{a_l}{1 + a_l(T - T_0)} \right] \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \right]^2 + \frac{C_s E_{рек} d Q(x, y_n) + I^2 [r_0 + r_0 a_r (T - T_0)] - p s e d (T^4 - T_0^4)}{2 S (I_0 + I_0 a_l (T - T_0))},$$

где  $x$  – координата вдоль проволоки,  $y_n$  – координата проволоки,  $Q(x, y_n)$  – плотность потока атомарного водорода,  $d$  – диаметр проволоки,  $C_s$  – коэффициент прилипания атомов водорода к поверхности,  $E_{рек}$  – энергия рекомбинации пары атомов,  $S$  – константа Больцмана,  $\epsilon$  – коэффициент отражения,  $T_0$  – температура вакуумной камеры или температура равновесного теплового излучения, в котором находится проволока,  $I$  – ток через проволоку. Теплопроводность проволоки:  $\lambda(T) = \lambda_0 + \lambda_0 \alpha_\lambda (T - T_0)$ ,

где  $\alpha_\lambda$  – температурный коэффициент теплопроводности и  $\lambda_0$  – теплопроводность при температуре  $T_0$ . Удельное сопротивление проволоки:

$$\rho(T) = \rho_0 + \rho_0 \alpha_\rho (T - T_0),$$

где  $\alpha_\rho$  – температурный коэффициент удельного сопротивления и  $\rho_0$  – удельное сопротивление при температуре  $T_0$ . Сопротивление проволоки при этом выражается через температуру как

$$R = \frac{1}{S} \int_{-L_0/2}^{L_0/2} \rho(x) dx = \frac{\rho_0}{S} \left[ L_0 (1 - \alpha_\rho T_0) + \int_{-L_0/2}^{L_0/2} T(x) dx \right].$$

Для выявления качественных закономерностей было найдено, в рамках упрощающих предположений, аналитическое решение, которое вполне можно использовать для малых потоков атомарного водорода. На основании аналитических вычислений были установлены границы параметров для проволок. Эффект рекомбинации атомарного водорода увеличивает сопротивление проволоки почти вдвое (при малых токах), что доступно для измерения практически любыми вольтметрами (соответствует изменению напряжения 90–150 мВ). Для измерений атомарного потока с помощью проволочного монитора была разработана специальная плата управления, вставляемая в РС. Кроме того, для использования монитора в составе атомарного источника в DESY, Гамбург, был разработан модуль КАМАК на базе процессора Atmel 89S8252 и интегрального аналого-цифрового преобразователя LTC2410 с разрешением около 1 мкВ, обеспечивающий управление монитором и измерение профиля атомарного пучка. 32 источника тока для питания

проволок управлялись 16-битным цифро-аналоговым преобразователем. Прибор предназначен для относительных измерений плотности потока. Пространственное разрешение и погрешность восстановления плотности потока – связанные величины, так как в процессе расчета двумерной картины потока участвует весь ансамбль проволок. Относительная погрешность складывается из измерительной погрешности (0.2 %) и погрешности восстановления плотности потока (4 – 6 % для 32-проволочного прибора с шагом проволоки 1 мм). Абсолютные измерения плотности потока имеют значительно большую погрешность из-за плохого знания коэффициента прилипания атомарного водорода к поверхности (погрешность 30 – 40 %) и зависимости этого коэффициента от способа нанесения и обработки поверхности.

Существуют измерители уровня криогенных жидкостей, работающие на различных физических принципах: гидростатические, ёмкостные, ультразвуковые, оптические, сверхпроводящие (для гелия) и дискретные полупроводниковые или интерметаллические, использующие принцип перегрева. Достоинства и недостатки каждого типа уровнемеров известны. Нами создан непрерывный уровнемер, в котором использован принцип разной теплоотдачи перегретой проволоки в средах жидкость-газ. Накладывается серьёзное ограничение – температура газовой части среды, в которой находится чувствительная часть уровнемера, не должна сильно отличаться от температуры жидкости. При этом, так как измеряемой величиной является сопротивление проводника, то проволока должна иметь высокий температурный коэффициент сопротивления.

Рассмотрим проволоку с высоким удельным сопротивлением, расположенную в сосуде, частично заполненном жидким азотом. Длина проволоки –  $L$ ; введем переменную  $x \in [0, L]$ , часть проволоки  $x \geq x_0$  находится в жидкости, остальная в газовой фазе. В замкнутом сосуде, полностью расположенном в вакууме, мы можем допустить отсутствие градиента температуры в газе над криогенной жидкостью. Считаем, что и жидкость, и газ в сосуде находятся при температуре  $T_0$ . Проволока нагревается электрическим током. Если  $I$  – электрический ток сквозь проволоку, то

$$F_{electr}(T) = \frac{r(T) \cdot I^2}{S}.$$

Из-за того, что коэффициент теплоотдачи в жидкости много больше коэффициента теплоотдачи в газе, мы можем принять допущение о полной термализации проволоки в жидкости. Т.е. вся часть проволоки, которая находится в жидкости, имеет температуру  $T_0$ . Таким образом, задача сводится к дифференциальному уравнению

$$Sl \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = - \left[ r_{l0} + r_{l0} \cdot a_r \cdot (T - T_0) \right] \cdot I^2 + e \cdot p \cdot d(T - T_0), \quad \text{где}$$

$e$  – коэффициент теплообмена [Вт/м<sup>2</sup>К]. Окончательно:

$$\begin{aligned} R(x_0) &= (1 - a_p T_0) r_{l0} L + r_{l0} a_p T_0 (L - x) + r_{l0} a_p T_0 x_0 + \frac{a}{b} x_0 \frac{2a \operatorname{ch}(\sqrt{bx_0}) - 1}{b^{\frac{2}{3}} \operatorname{sh}(\sqrt{bx_0})} = \\ &= r_{l0} L - r_{l0} a_p \frac{a}{b} \left[ x_0 \frac{2 \operatorname{ch}(\sqrt{bx_0}) - 1}{\sqrt{b} \operatorname{sh}(\sqrt{bx_0})} \right]. \end{aligned}$$

Зависимость сопротивления от уровня жидкости в сосуде распадается на две части – линейную и нелинейную (комбинация гиперболических синусов – косинусов). Интуитивно понятно, что в предельном переходе, при стремлении диаметра проволоки к нулю, когда проволока полностью принимает температуру окружающей среды в жидкости и равномерно перегревается на постоянную величину в газе, остается только линейная часть. Однако, уменьшению диаметра проволоки препятствует сложность работы с тонкими проволоками, их малая механическая прочность. Экспериментальным путем выбрана проволока из вольфрам-ренийевого сплава, диаметром 20 мкм, которая и была использована для изготовления непрерывных уровнемеров жидкого азота. Интегральная нелинейность реальной калибровочной кривой составила не более 6%. Измерительная схема состоит из микропроцессора, источника тока и АЦП. Эти уровнемеры успешно использовались в течение 6 месяцев в эксперименте MuCAP для установки сверхвысокой очистки водорода CHUPS.

**Четвёртая глава** посвящена автоматизации **CHUPS** (Circulating Hydrogen Ultrahigh Purification System) – системы сверхвысокой очистки водорода для эксперимента MuCAP по  $\mu$ -захвату на водороде (PSI, Швейцария). Сечение захвата мюона пропорционально  $Z^4$  для  $Z$  от 1 до 10 и далее медленно снижается ( $Z$  – зарядовое число элемента). Поэтому содержание примесей (воды, кислорода, азота и других газов) в водороде должно быть не более  $10^{-8}$ . Основным загрязняющим элементом газовой системы был сам детектор, времяпроекционная камера (Time Projection Chamber, TPC). Предварительно очищенный до нужной кондиции водород недопустимо загрязнялся через несколько часов работы, поэтому была создана рециркуляционная система очистки водорода. В разработанной системе отсутствовали механические побудители расхода, являющиеся дополнительным источником загрязнения. Основными частями установки являются компрессор, блок очистки и система управления. Назначение компрессора – обеспечивать

непрерывную циркуляцию водорода через блок очистки и ТРС со скоростью, достаточной для поддержания заданной чистоты газа в ТРС. По принципу действия компрессор является криосорбционным насосом. Выбор такой конструкции обусловлен следующими достоинствами криосорбционных насосов:

- высокая надежность, обусловленная простотой заложенного в основу принципа и отсутствием движущихся частей;
- высокая чистота, отсутствие источников дополнительных загрязнений (воды, масла и т.п.) внутри насоса;
- достаточно большой диапазон регулирования величины расхода водорода.

Работа криосорбционного насоса основана на способности специального вещества (адсорбента) поглощать (адсорбировать) значительное количество газа (в данном случае водорода) при низких температурах, и отдавать (десорбировать) его при последующем отогреве. В данном случае в качестве адсорбента используется активированный уголь. Охлаждение его производится жидким азотом (температура кипения при нормальном давлении около 78 К), отогрев – электрическими нагревателями.

Работа блока очистки основана на преобладающем (по сравнению с основным компонентом, водородом) поглощении примесей (азота, кислорода, воды) в адсорбционном фильтре. В качестве наполнителя адсорбционного фильтра применен синтетический цеолит. Для усиления степени поглощения примесей так же, как и в случае компрессора, используется охлаждение адсорбента жидким азотом. Использование универсального по отношению к компонентам примесей адсорбционного метода гарантирует высокую степень очистки по самому широкому кругу веществ. Каждая колонка криосорбционного насоса является периодически действующим устройством. Объединенные в блоке три колонки со смещенными относительно друг друга температурными фазами (охлаждение и нагрев) обеспечивают пульсирующий, но практически непрерывный поток водорода в системе. В процессе циркуляции газ, загрязненный в детекторе, подвергается очистке дважды. Сначала он проходит предварительную стадию очистки в первом фильтре, поступая из ТРС в компрессор. После этого происходит окончательная очистка во втором фильтре, установленном на нагнетательной линии компрессора перед буферным объемом и ТРС.

Система управления состоит из микропроцессорного блока управления на базе AT89S8252, набора датчиков и устройств (дистанционно управляемых клапанов, контроллеров расхода и нагревателей) и управляющего компьютера (PC).

Микропроцессорный блок управления служит для организации работы системы в автономном режиме. Он осуществляет чтение сигналов датчиков температуры, давления, запаса жидкого азота и производит все проце-

дуры управления нижнего уровня. Работа блока управления контролируется оператором с помощью РС посредством специально разработанного программного обеспечения. Аналоговые сигналы с датчиков разделены на две группы. В первую группу входят 16 сигналов с термометров сопротивления Pt-100. Эти датчики обеспечиваются стабильным измерительным током 1 мА от источника тока через 16-канальный коммутатор MAX336. Датчики подключаются по 4-проводной схеме. Потенциальные сигналы поступают на 16-канальный коммутатор MPC506, и после коммутации и усиления на инструментальном усилителе INA118 подаются на один из входов второго коммутатора MPC506, который используется для всех остальных датчиков. Во вторую группу входят до пяти токовых датчиков (датчики давления, влажности с выходом 4-20 мА), сигналы с контроллеров расхода и уровней. Микропроводные датчики уровня жидкого азота непрерывного типа обеспечиваются стабильным током 40 мА от источника тока с коммутацией на 4-канальном переключателе MAX313.

Таким образом, всего прибор допускает подключение 31 датчика, 16 из которых – термометры сопротивления. После коммутации и усиления на усилителе AD711 сигналы со всех датчиков преобразуются в цифровой код на АЦП ADS7807 и записываются в память контроллера.

Для управления установкой прибор оснащен:

- 16 цифровыми выходами типа «открытый коллектор» для управления нагревателями колонок компрессора и клапанами;
- четырьмя аналоговыми каналами для управления контроллерами расхода азота (12 бит, 0÷5 В);
- четырьмя аналоговыми каналами для управления контроллерами расхода водорода (16 бит, 0÷5 В);
- четырьмя блоками питания нагревателей с широтно-импульсным управлением, мощность каждого 1кВт.

Система управления показала себя надежной и удобной в эксплуатации. В ходе многочисленных экспериментальных сеансов (максимальное время непрерывной работы 2 месяца, суммарное – более 8 месяцев) не выявлено серьезных недостатков, которые могли бы привести к сбоям в работе системы очистки. В результате была получена уникальная чистота рабочего газа: концентрация примесей в водороде составила: азот и кислород – не более  $5 \cdot 10^{-9}$ , вода –  $3 \cdot 10^{-9}$  на выходе установки и  $2 \cdot 10^{-8}$  в детекторе, что позволило исключить из анализа экспериментальных данных погрешности, связанные с примесями.

**Пятая глава** посвящена разработке и использованию измерительных средств в проекте CELGAS. Изучение спин-зависимых эффектов в ядерных реакциях, таких как нуклон-нуклонные взаимодействия, реакции рождения мезонов, изучение развала дейтрона в p-d- столкновениях, рождение стран-



ных частиц в реакциях типа  $pp \rightarrow pK^+\Lambda$ , требует использования поляризованных водородных или дейтериевых мишеней. До недавнего времени все подобные эксперименты проводились на твёрдотельных поляризованных мишенях. Новый тип мишеней появился только в последние десять лет, в них материал мишеней (поляризованные водородные или дейтериевые ядра) был заменён на поляризованные атомы из источника поляризованных атомов. Вместе с использованием накопительных колец, которые позволяют увеличить поток заряженных частиц, был использован принцип накопительной ячейки, в которую инжектируются атомы. Ячейка имеет Т-образную форму. Именно такой комбинацией удалось получить достаточную светимость для исследования малых сечений адронных реакций. Однако, столкновение атомов и молекул со стенками накопительной ячейки приводит к уменьшению поляризации. Возникает необходимость проведения экспериментов по оптимизации геометрических размеров, покрытия стенок, температуры стенок, магнитного поля и других параметров, влияющих на сохранение поляризации атомов и молекул. Первые эксперименты с этой целью проводились непосредственно на ускорителях, однако для этого требуются значительное время работы ускорителя и большие финансовые затраты.

Изучение влияния различных факторов (температура, материал покрытия, величина магнитного поля, степень вакуумной откачки и др.) на сохранение поляризации атомов и молекул, образованных в результате рекомбинации, в эксперименте (CELGAS) позволяет создать мишень с достаточно большой степенью поляризации атомов и увеличить выход ожидаемых взаимодействий пучка ускорителя с мишенью.

Накопительная ячейка в виде Т-образной трубки расположена в пространстве между двумя сверхпроводящими соленоидами. В ней происходят основные процессы эксперимента CELGAS :

- создается облако поляризованного атомарного водорода (дейтерия);
- происходит рекомбинация поляризованного атомарного водорода в молекулярный водород на внутренней поверхности ячейки;
- происходит ионизация атомарного и молекулярного водорода электронным пучком.

Сверху в трубку входит поток поляризованного атомарного водорода, слева находится электронная пушка, предназначенная для ионизации атомарного водорода или дейтерия в объёме ячейки. Справа расположен тракт проводки ионного пучка. Далее пучок попадает для анализа в Лэмбовский поляриметр. Для управления экспериментальной установкой CELGAS был разработан ряд приборов, которые позволили создать модульную систему управления, состоящую из РС и восьми микропроцессорных модулей. Все приборы подключены через общую последовательную шину (RS-485) к

управляющему компьютеру и составляют единую автоматическую систему управления. При этом решена проблема подключения к общей шине устройств, подвешенных под высоким потенциалом (до 26 кВ). Применение микроконтроллеров в каждом приборе делает эту систему весьма гибкой, с возможностью переложения части задач управления на сами приборы. Общее количество измерительных каналов установки – более 100. Число каналов управления – около 80. При этом удачное применение современной элементной базы и унификация аналоговых сигналов позволили разработать универсальные модули и приборы для управления различными частями установки. Так, все источники высокого напряжения, независимо от их типа, управляются тремя одинаковыми модулями. Прибор для измерения уровня жидкого гелия с успехом используется для термометрии и стабилизации температуры накопительной ячейки.

Источник питания сверхпроводящих магнитов SCPS стабильно работает во всех экспериментальных сеансах. Отличительной особенностью источника является шестифазный двухполупериодный выпрямитель переменного тока. Уровень пульсаций выходного напряжения или тока после выпрямителя составляет всего 1.5-2 % при максимальном токе 200 А. Кроме того, его пульсации с частотой 600 Гц легче подавляются LC-фильтрами.

Прецизионный 3-канальный магнитометр для измерения магнитного поля сверхпроводящих соленоидов обеспечивает разрешение  $\pm 0.1$  мТл в широком диапазоне от 1 мТл до нескольких Тесла. В прибор заложена возможность повышения точности измерений магнитного поля за счет использования температурной компенсации датчика Холла. Система управления показала себя надежной и удобной в эксплуатации. На установке получен пучок ионов водорода с током до 2мкА ( $\sim 10^{16}$  /с/см<sup>2</sup>) и энергией от 0 до 5кэВ.

**Заключение** содержит основные результаты проделанной работы.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Комплексная автоматизация пузырьковой камеры, стабилизация температурного режима с точностью  $\pm 0.03$ К, повышение эффективности работы камеры и использования ускорительного времени.
2. Разработка и создание автоматизированной системы управления термодинамическими параметрами криогенной ионизационной камеры высокого давления, работающей в диапазоне температур 30÷400К с абсолютной точностью измерения температуры 0.1К. Система позволила провести уникальные по точности измерения параметров мезокаталитического синтеза. Измерены абсолютные значения скорости  $d\mu$ -синтеза как функции температуры. Кроме того, проведены уникальные по точности измерения скоростей переворота спина в  $\mu$ -атоме  $\lambda_{3/2 \rightarrow 1/2}$  и исследования ( $d$  <sup>3</sup>He) ядерного мезокаталитического синтеза.

3. Создание ряда новых методов и приборов для неразрушающего контроля полей температур и скоростей газовых и жидкостных потоков, а также для измерения плотности атомарного пучка водорода (дейтерия). Разработка нового метода измерения уровня непроводящей жидкости.
4. Комплексная автоматизация рециркуляционной криогенной системы сверхвысокой очистки водорода (CHUPS) для эксперимента по исследованию захвата мюона протоном. Система обеспечила концентрации примесей в водороде на уровне  $5 \cdot 10^{-9}$  для азота и кислорода и  $2 \cdot 10^{-8}$  для воды.
5. Разработка и создание автоматизированной системы управления для эксперимента по исследованию ядерной поляризации молекул, образованных из поляризованных атомов и факторов деполяризации атомарных пучков в накопительных ячейках (проект МНТЦ 1861).

**По теме диссертации опубликованы следующие работы:**

1. V. A. Trofimov, A. A. Vasilev, A. I. Kovalev and P. A. Kravtsov. A two-coordinate detector for a beam of atomic hydrogen or deuterium. *Instruments and Experimental Techniques* **48**, N 1, 2005.
2. V.P. Andreev, A.V. Kravtsov, ..., V.A. Trofimov. Measurement of the cross section of the re-action  $pp \rightarrow p \pi^0$  in the region of dibarion resonances. *Zeitschrift fur Physik* **A329**, 1988, 371-373.
3. Андреев В.П., Добырин В.В.,.....Трофимов В.А. Корреляционные измерения спектров протонов в заднюю полусферу в реакции  $pd \rightarrow ppp$  при 1.2-1.7 Гэв/с. *Ядерная физика* **37**, в.6, 1985,1420-1426.
4. L.G. Dakhno, A.V. Kravtsov, ..., V.A. Trofimov. Enhancing delta3-3 resonance effect in the cumulative nucleon spectra from the deuterium breakup reaction  $\pi d \rightarrow \pi p n$ . *Phys. Lett.* **123B**, 1, 1983, 33.
5. Дахно Л.Г., Кравцов А.В.....Трофимов В.А. Измерение сечений парного рождения мезонов в нуклон-нуклонных соударениях при энергии ниже 1 Гэв и изоспиновый анализ. *Ядерная физика* **37**, в.4, 1983, 907-913.
6. D.V. Balin, V.A. Trofimov и др., Investigation of temperature dependence of the muon catalyzed fusion in deuterium, *Muon Catalyzed Fusion* **2** (1988) 241-246.
7. N.IVoropaev, ..., V.A. Trofimov et al., First observation of spin flip in  $\mu dd$  molecules, *Nucl. Interact.* **118** (1999) 135-140.

8. M. Poltavtsev, ..., V. Trofimov et al. Nuclear Polarization of Hydrogen and Deuterium Molecules after Recombination of Polarized Atoms in a Storage Cell. Meeting of the German Physical Society 2005, Berlin.
9. Васильев А.А., Козлов С.М., Трофимов В.А., Чернов Н.Н., Монитор тепловых потоков, Препринт ЛИЯФ 1622, Ленинград, 1990, 20 стр.
10. Безмянных, ... В.А. Трофимов, и др. Криогенная циркуляционная система сверхвысокой очистки водорода для эксперимента MuCAP. Препринт ПИЯФ 2611, Гатчина, 2004, 17 стр.
11. Trofimov, N. Chernov, P. Kravtsov, A. Vassiliev. Superconductive Coils Power Supply. Preprint PNPI 2549, Gatchina, 2004, 17p.
12. Д.В.Балин, А.А.Воробьев и др., Экспериментальный метод исследования мюонного катализа ядерного dd-синтеза Препринт ЛИЯФ-964, Ленинград, 1984, 54 с.
13. V. Trofimov, N. Chernov, A. Kovalev, L. Kochenda, P. Kravtsov, A. Vassiliev. Control system for inductively coupled superconductive magnets. Preprint PNPI 2549, Gatchina, 2004, 17p.
14. Д.В. Балин, В.А. Трофимов и др., Криогенная ионизационная камера для изучения мюонного катализа, Препринт ЛИЯФ-1630, Ленинград, 1990, 24 стр.