

**Автоматизированная система контроля и управления  
комплексом подготовки газовой смеси для экспериментального исследования  
мюонного катализа ядерных реакций синтеза**

Ю.И.Виноградов, В.С.Арюткин, В.А.Куракин, В.В.Травкин, А.А.Юхимчук

**Аннотация**

Описана автоматизированная система контроля и управления комплексом подготовки газовой смеси установки "ТРИТОН", предназначенной для проведения экспериментальных исследований мюонного катализа ядерных реакций синтеза в тройных смесях изотопов водорода Н/D/T в широком диапазоне температур и давлений.

Система обеспечивает функции контроля и управления комплексом подготовки газовой смеси, контроль и управление параметрами мишени, контроль состава газовой смеси и дозиметрический контроль.

В ходе многочисленных физических экспериментов, проведенных на установке "ТРИТОН" начиная с 1997 года, автоматизированная система контроля и управления показала хорошие эксплуатационные характеристики, высокую надежность и возможность быстрой адаптации для решения новых задач.

**Введение**

Для проведения систематических исследований мюонного катализа ядерных реакций синтеза в тройных смесях изотопов водорода Н/D/T в диапазоне температур 20÷800К, давлений до 160 МПа и активностях трития в свободном состоянии до 10 кКи коллаборацией РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) и ОИЯИ (Дубна) создана установка "ТРИТОН". Установка состоит из: комплекса для подготовки газовой смеси (КПГС) /1/, криогенной установки /2/, системы детектирования и регистрации продуктов ядерных реакций /3/ и сменных мишеней, структурно входящих в КПГС – жидкотритиевой (ЖТМ) /4/, тритиевой мишени высокого давления (ТМВД) /5/, дейтериевой мишени высокого давления (ДМВД) /6/ и ряда других.

Конструктивно комплекс состоит из 10 связанных между собой установок и систем (см. рис. 1) /1/.

- герметичного бокса, в котором расположены основные функциональные элементы КПГС, обеспечивающие подготовку смеси заданного состава и чистоты и подачу ее к мишени;
- вакуумного пульта, обеспечивающего вакуумирование рабочих газовых коммуникаций, утилизацию основного количества тритийсодержащей газовой смеси и молекулярный анализ газовой смеси;
- ресивера, предназначенного для сброса "хвостов" газовой смеси с выхлопов формакуумных насосов;
- установки газовой очистки, предназначенной для очистки газовых смесей от следов трития и его соединений, находящихся в герметичных объемах (боксе, ресивере и т.п.);
- установки раннего предупреждения выбросов, предназначенной для предотвращения выбросов в атмосферу газовых смесей, содержащих тритий выше установленных норм;

- сборки насосов, обеспечивающей вакуумирование газовых коммуникаций, герметичных технологических объемов, ресивера и т.п.;
- баллонного поста, обеспечивающего подачу диффузионно чистых протия и дейтерия к КППС, заполнение герметичных технологических объемов инертным газом и питание газового радиохроматографа газом-носителем;
- системы радиометрического контроля, обеспечивающей контроль состояния элементов КППС и радиационной обстановки в рабочей зоне;
- электрического пульта, обеспечивающего управление и контроль КППС и МВД;
- автоматизированной системы контроля, обеспечивающей контроль состояния основных элементов КППС и МВД, а также автоматическую запись протокола эксперимента.

На начальном этапе управление и контроль КППС и мишенями осуществлялись с электрического пульта. Пульт обеспечивал измерение температур и давлений, управление вакуумными насосами и измерение вакуума, регулирование температуры источников и фильтров.

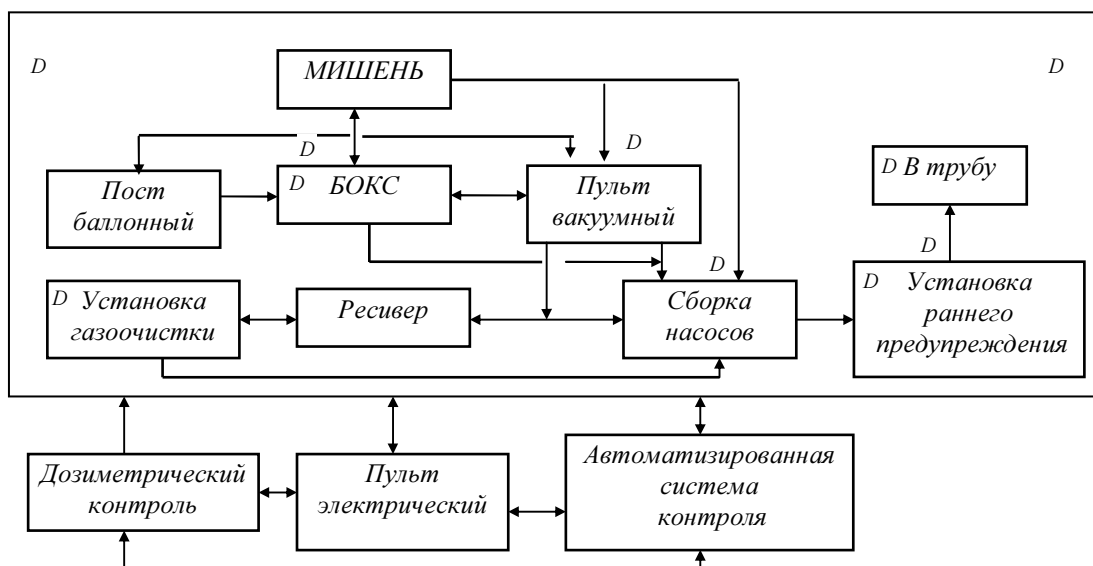


Рис. 1. Структурная схема КППС /1/: D – точка дозиметрического контроля.

Контроль аналоговых технологических параметров осуществлялся с помощью автономных приборов, все операции регулирования выполнялись вручную и требовали постоянного внимания оператора.

Автоматизированная система контроля комплекса дублировала контрольные функции пульта и выполняла ряд других задач:

- контроль состояния клапанов и вентиляторов комплекса;
- контроль температур и давлений в узлах комплекса;
- контроль состава газовой смеси;
- контроль параметров мишени;
- ведение протокола эксперимента;
- математическая обработка данных.

Система контроля была разработана на базе модульной аппаратуры в КАМАК-стандарте (аналоговые мультиплексоры, аналого-цифровые преобразователи, входные регистры) и аппаратуры с интерфейсом IEEE-488 (вольтметры

электрометрические). В этом виде автоматизированная система контроля использовалась с 1996 по 1998 год.

В 1999 года была проведена поэтапная модернизация автоматизированной системы контроля комплекса. Модернизированная система контроля и управления (СКУ) реализована на современной аппаратуре, ей переданы практически все функции электрического пульта, за исключением управления насосами.

Ниже приведено описание современного состояния автоматизированной системы контроля и управления комплекса.

## 1. Структура и аппаратный состав СКУ.

В составе СКУ, как объекта контроля и управления, можно выделить следующие основные подсистемы:

- подсистема контроля и управления элементами КППС;
- подсистема радиационного контроля;
- подсистема мишени (ТМВД /5/, ДМВД /6/, ЖТМ /4/);
- подсистема контроля молекулярного состава газовой смеси /7/.

В процессе подготовки эксперимента и его проведении существуют особенности эксплуатации подсистем СКУ:

- подсистемы подготовки газовой смеси и радиационного контроля используются непрерывно с начала подготовки эксперимента и до его завершения;
- подсистема мишени используется на этапе подготовки мишени, при ее заполнении и эксплуатации;
- подсистема контроля молекулярного состава используется периодически для анализа проб газовой смеси;
- часто возникает необходимость одновременной работы операторов со всеми указанными подсистемами.

Учитывая необходимость наблюдения за большим количеством технологических и физических параметров, необходимость одновременной работы со всеми подсистемами комплекса, а также для удобства работы оперативного персонала, обслуживающего КППС, СКУ конструктивно выполнена в виде 3 подсистем (рис.2).

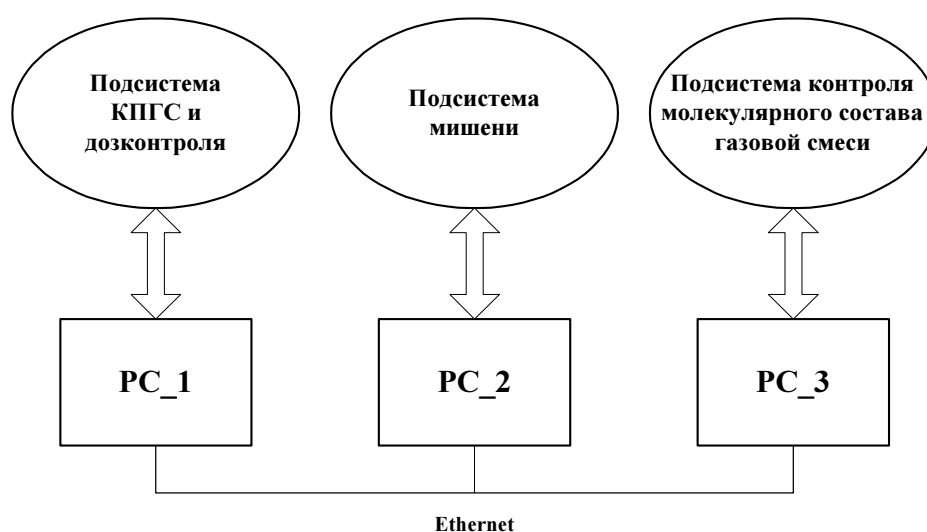


Рис.2. Структура системы контроля и управления.

Первая подсистема обеспечивает работу КППС и дозиметрический контроль, вторая – работу с мишенью, а третья – контроль молекулярного состава газовой смеси. Каждая подсистема базируется на отдельном персональном компьютере, компьютеры подсистем объединены между собой по сети Ethernet.

Подсистемы контроля и управления построены в виде распределенных сетей из набора интеллектуальных модулей, связанных с управляющим компьютером по стандарту RS-232 и RS-485.

Для аналогового/дискретного контроля и управления выбраны модули серии I-7000 фирмы ICP DAS. Модули этой серии по многим аппаратным характеристикам совместимы с изделиями других производителей (ADAM, NUDAM, серия 6В Analog Devices), но обладают рядом преимуществ, которые обеспечивают большую надежность и безопасность системы автоматизации:

- имеют аппаратный сторожевой таймер, который автоматически перезапускает модуль в случае его "зависания";
- имеют программный сторожевой таймер, который отслеживает состояние управляющего компьютера. В случае "зависания" компьютера или обрыва коммуникаций этот таймер переводит все выходы модуля в заранее предустановленные (по условиям безопасности) для подобного случая состояния;
- позволяют производить "горячую", т.е. без выключения системы, замену любого модуля.

Для контроля вакуума используются датчики фирмы Balzers Instruments, которые подключаются к контроллерам TPG, оснащенным интерфейсом RS-232. Для контроля радиационной обстановки используются микропроцессорные контроллеры КРО с интерфейсом RS-485, а для контроля состояний вентилях и клапанов ISA-адаптер дискретного ввода/вывода DIO-144.

При проведении экспериментов на аппаратуру системы контроля и управления воздействуют электромагнитные помехи, возникающие при включении/выключении и работе вакуумных насосов, электромагнитных вентилях, нагревателей и т.д. Поэтому при разработке СКУ особое внимание было уделено обеспечению помехозащищенности измерительных каналов и каналов управления, гальванической изоляции входных и выходных цепей.

Программное обеспечение системы измерений и управления комплекса разработано на базе пакета CRW-DAQ, который представляет собой мощную многооконную среду для создания измерительных систем, систем управления и обработки данных. Ядро программного пакета CRW\_RUN.EXE запускается в системе DOS или в сеансе DOS под Windows 95/98 на всех трех компьютерах СКУ. Конкретная программа работы на каждом компьютере определяется загружаемым конфигурационным файлом, который подобен *.ini*-файлу операционной системы Windows.

## 2. Подсистема КПГС и радиационного контроля

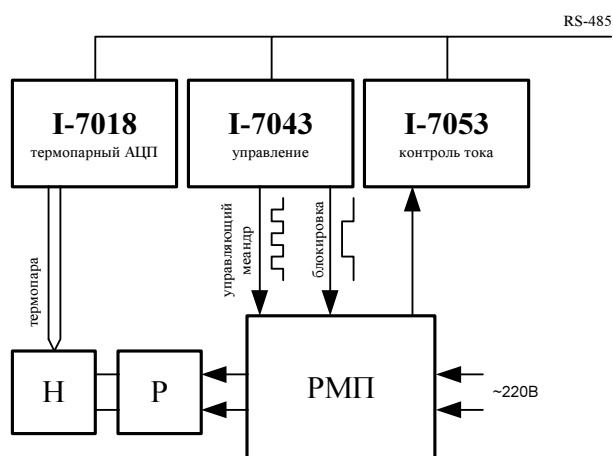
КПГС /1/ обеспечивает подготовку смеси заданного состава и чистоты и подачу ее в мишень, вакуумирование газовых коммуникаций, утилизацию основного количества тритийсодержащей газовой смеси, очистку газовых смесей от следов трития и его соединений.

### 2.1. Управление нагревателями

В КПГС в качестве источников давления используются генераторы на основе гидридов металлов /8/, а для очистки от примесей – диффузионные палладиевые фильтры /9/. При работе генераторов и фильтров необходимо управлять температурой их нагрева, контролировать и стабилизировать температуру, контролировать обрывы в цепях нагрузки, отключать электропитание нагревателей при превышении заданных температур и давлений, блокировать возможность включения нагревателей при определенных состояниях вентилей.

Для управления нагревом была разработана многоканальная программно-аппаратная подсистема. При ее разработке особое внимание было уделено надежности и защищенности в случае аварийных ситуаций - подсистема ни в коем случае не должна допускать перегрев нагреваемого объекта выше критического уровня, а в ряде случаев должна блокировать нагреватель по превышению давления, уровня радиации и т.д. Блок-схема одного канала управления нагревом приведена на рис.3.

Температура нагрева измеряется термопарой, термо-э.д.с.  $\epsilon$  регистрируется модулем многоканального аналогового ввода типа I-7018 с точностью 0,05%. Преобразование термо-э.д.с. в температуру выполняется с использованием сплайн-описания стандартной табличной зависимости  $\epsilon(T)$  термопары данного типа. Программное обеспечение подсистемы позволяет работать практически с любыми типами стандартных термопар (хромель/алюмель, хромель/копель, медь/константан, железо/константан, вольфрам/рений и т.д.).



- РМП - регулятор мощности полупроводниковый
- Р - реле блокировки нагревателя
- Н - нагреватель
- I-7018 - многоканальный модуль аналогового ввода
- I-7043 - многоканальный модуль дискретного вывода
- I-7053 - многоканальный модуль дискретного ввода

Рис.3. Блок-схема канала управления нагревом.

Для управления нагревом разработаны регуляторы мощности полупроводниковые РМП-1 (рис.4), управляемые внешним логическим сигналом. Максимальная выходная мощность регулятора до 1 кВт, регулирование осуществляется методом широтно-импульсной модуляции с периодом 2÷5 секунд. Нагреваемые объекты достаточно массивны, поэтому колебания, связанные включением/выключением мощности, интегрируются и на наблюдаемой температуре объекта не проявляются. Управление регуляторами мощности осуществляется компьютером через многоканальные модули дискретного вывода I-7043, температура стабилизируется с точностью  $\pm 2\text{ C}^\circ$ .

В регуляторе мощности имеется датчик тока нагрузки, выходной сигнал датчика регистрируется модулем дискретного ввода I-7053. На случай неконтролируемой подачи мощности на нагреватель, например в случае короткого замыкания выходного элемента регулятора, введено реле блокировки, управляемое через модули дискретного вывода типа I-7043.

Надежность и защищенность подсистемы обеспечены применением модулей серии I-7000, которые при потере управления со стороны компьютера автоматически выключают регулятор мощности и включают релейную блокировку.

Подсистема контроля и управления КПГС включает 7 таких каналов регулирования для генераторов BS1, BS2, BS3, BS4 и фильтров F1, F2, F3. Управление нагревом осуществляется через активную мнемосхему (рис.5). Программное обеспечение канала позволяет измерять, задавать и стабилизировать температуру нагрева; задавать условия блокировки нагревателей по температурам и давлениям.



Рис.4. Регулятор мощности РМП-1.

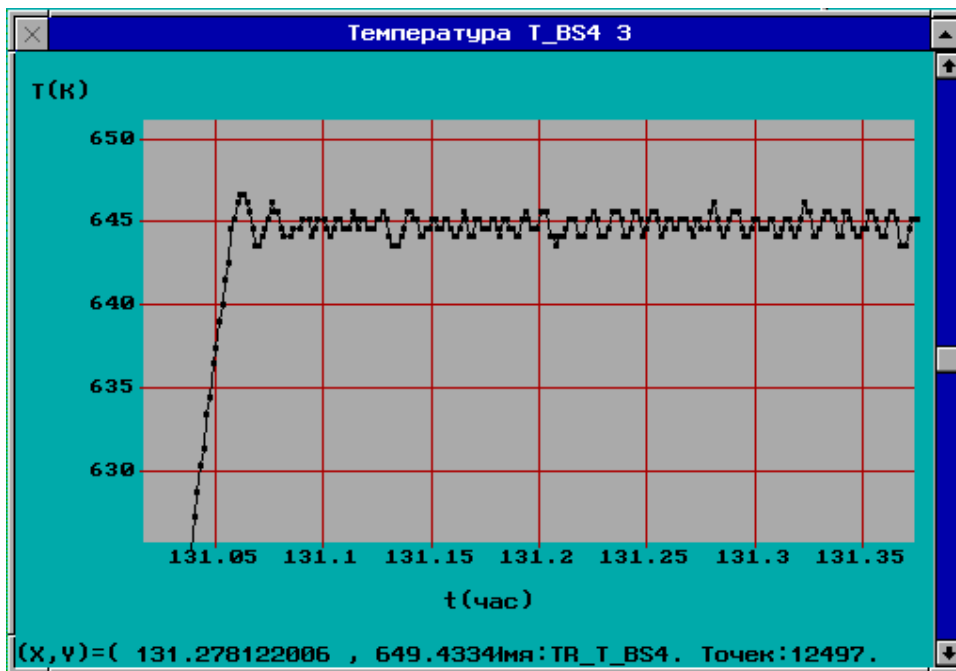


Рис.5. Панель управления нагревателями КППС и график стабилизации температуры.

## 2.2. Контроль аналоговых и дискретных параметров комплекса.

Для контроля вакуума в узлах комплекса используются четыре термовакууметрические лампы ПМТ-4М и 2 датчика для измерения вакуума типа ИКР261, ТРР260 (фирма Balzers). Лампы ПМТ подключаются к электронному блоку, обеспечивающему регулировку и контроль тока ламп. Выходное напряжение термопреобразователей ламп ПМТ-4М измеряется многоканальным модулем аналогового ввода I-7018, давление вакуума вычисляется по приведенной в документации лампы калибровке.

Датчики вакуума фирмы Balzers подключаются через 6-канальный контроллер TRG-256, управление контроллером и сбор цифровых данных по вакууму осуществляются через порт RS-232.

Высокие давления измеряются тензометрическими датчиками, а низкие давления до 10÷20 атмосфер - датчиками типа САПФИР. Питание тензометрических датчиков осуществляется от стабилизированного блока питания с выходным напряжением +12 В. Выходные сигналы тензометрических датчиков и датчиков типа САПФИР регистрируются модулями аналогового ввода I-7018. Для преобразования зарегистрированных напряжений в давления используются полиномиальные описания индивидуальных калибровок каждого датчика.

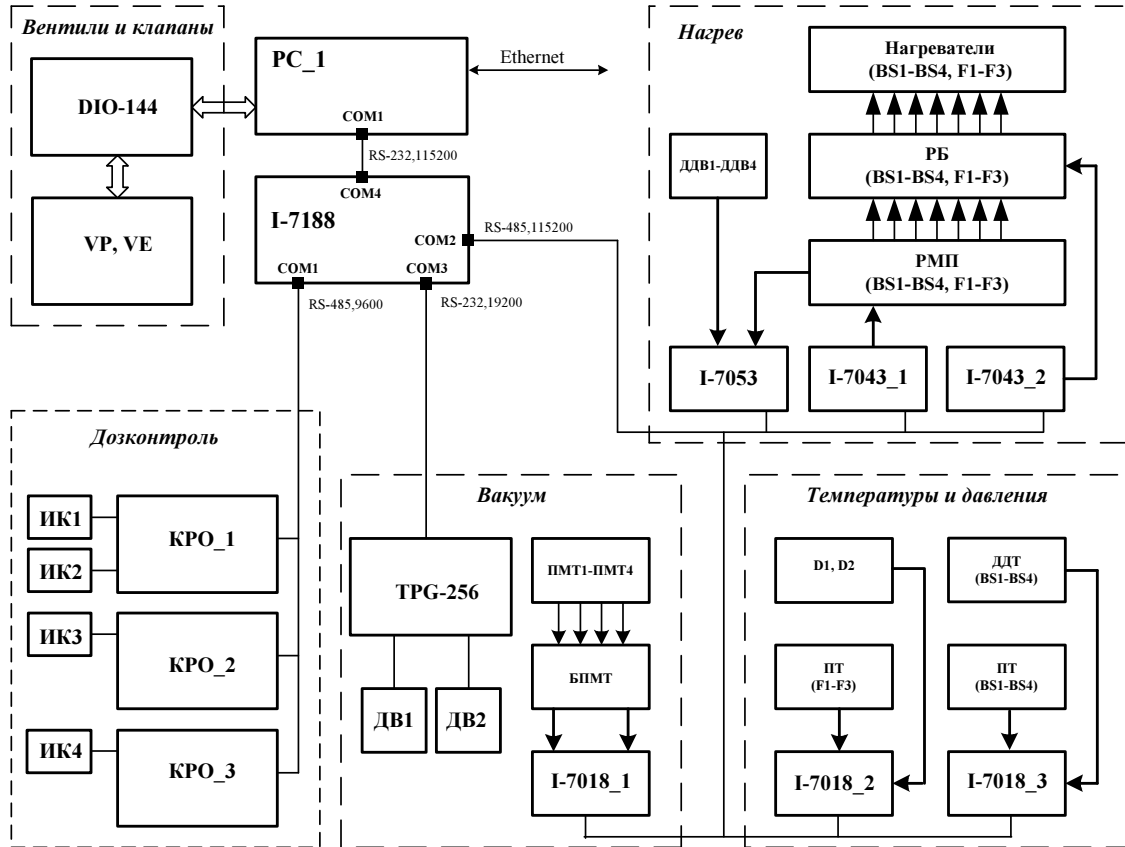
Состояния вентилей (VP) и электромагнитных клапанов (VE) установки (110 датчиков положений, по 2 датчика на каждый клапан) контролируются адаптером дискретного ввода/вывода DIO-144, установленным на ISA-шине управляющего компьютера. Сигналы дискретных датчиков поступают на цифровые входы адаптера через коммутационный блок, который обеспечивает их преобразование в стандарт TTL. Состояния 4-х датчиков давления воды контролируются многоканальным модулем дискретного ввода I-7053. Программа системы автоматизации обеспечивает отображение состояний вентилей, клапанов и датчиков давления воды на экране компьютера.

### 2.3. Структура подсистем КППС и дозиметрического контроля

Подсистема контроля и управления КППС и дозиметрического контроля базируется на управляющем компьютере PC\_1, блок-схема подсистемы представлена на рис.6. Для подключения к компьютеру PC\_1 устройств с разными интерфейсами и скоростями передачи (модули серии I-7000, контроллер TPG-256, контроллеры радиационной обстановки КРО) используется интеллектуальный, адресуемый преобразователь интерфейса на базе ПС-совместимого микропроцессорного контроллера I-7188, имеющего 4 порта последовательного ввода/вывода. Порт COM4 (RS-232) используется для связи с управляющим компьютером.

Неадресуемый контроллер TPG-256 подключаются к порту COM1 модуля I-7188 и, с точки зрения управляющего компьютера, имеет собственный виртуальный адрес. Модули серии I-7000 подключаются к порту COM2 (RS-485, скорость обмена 115200 бод). Двухканальные измерительные блоки контроля радиационной обстановки подключаются через порт COM3 (RS-485, скорость обмена 9600 бод).





PC_1	- управляющий компьютер подсистемы
I-7188	- ПС-совместимый микропроцессорный контроллер
DIO-144	- 144-канальный ISA-адаптер дискретного ввода/вывода
VP, VE	- контролируемые вентили и электромагнитные клапаны
КРО	- микропроцессорные контроллеры радиационной обстановки
ИК	- ионизационные камеры
TPG-256	- 6-канальный контроллер для вакуумных датчиков фирмы Balzers
ДВ	- датчики вакуума фирмы Balzers
D	- датчики давления САПФИР-22-Ех-М
ПМТ	- лампы типа ПМТ-4
БПМТ	- блок подключения ламп ПМТ
ПТ	- преобразователи терморпарные
РМП	- регуляторы мощности полупроводниковые
РБ	- реле блокирующие
ДДТ	- датчики давления тензометрические
I-7018	- 8-канальный модуль аналогового ввода
I-7043	- 16-канальный модуль дискретного вывода
I-7053	- 16-канальный модуль дискретного ввода
ДДВ	- датчики давления воды

Рис.6. Структурная схема подсистемы КПГС и дозиметрического контроля.

## 2.4. Дозиметрический контроль

При проектировании комплекса газового обеспечения особое внимание уделялось вопросам радиационной безопасности при работе с тритием. Безопасность обеспечивается как путем использования принципов физической защиты при построении газовой системы установки, так и подсистемой дозиметрического контроля по тритию.

На начальном этапе для измерения объемной активности трития в газовых коммуникациях и воздухе рабочей зоны использовались промышленные радиометры газов РГБ-06. Радиометр состоит из блока детектирования типа БДГБ-02П (проточная или диффузионной ионизационной камеры объемом 1 литр или 10 литров с преобразователем БПН-16П) и пульта измерительного УИ-117П, который служит для приема информации и управления блоком детектирования. Однако радиометры РГБ-06 не имеют средств для включения в автоматизированные системы контроля и управления.

Поэтому, в процессе модернизации системы контроля и управления комплекса, был разработан радиометр трития автоматизированный многоканальный РГБ-06МА, в котором обеспечена совместимость с унифицированными блоками детектирования БДГБ-02П и возможность интеграции в системы управления установок. Радиометр состоит из микропроцессорного контроллера радиационной обстановки (КРО), к которому можно подключить два промышленных блока детектирования БДГБ-02П (см. рис.7). Контроллер радиационной обстановки обеспечивает:

- управление режимами работы блоков детектирования (измерение, контроль, блокировка);
- измерение объемной активности трития с учетом фоновго уровня объемной активности;
- двухпороговый анализ состояния радиационной обстановки по каждому из каналов и управление двумя стандартными внешними блоками сигнализации БСР-19П;
- связь контроллера с управляющим компьютером по стандарту RS-485.



Рис.7. Контроллер радиационной обстановки КРО и блок детектирования БДГБ-02П.

Радиометр РГБ-06МА прошел процедуру утверждения типа средства измерения (получен сертификат RU.C.38.046.A №11019 от 01.11.2001). Он обеспечивает

измерение объемной активности по тритию в диапазоне от  $5 \cdot 10^5$  Бк до  $5 \cdot 10^{10}$  Бк с ионизационной камерой объемом 1 л, и от  $5 \cdot 10^4$  Бк до  $5 \cdot 10^9$  Бк с камерой объемом 10 л. Предел допускаемой относительной основной погрешности измерения объемной активности трития не более  $\pm 25\%$ , а при градуировании и поверке по гамма-излучению  $^{60}\text{Co}$  не более  $\pm 20\%$ .

Радиометр может работать как в автономном режиме, так и в составе многоканальной автоматизированной системы радиационного мониторинга. При работе в автономном режиме обеспечиваются функции измерения объемной активности и пороговой сигнализации. При работе в составе многоканальной системы измерительные блоки контроля радиационной обстановки объединяются в локальную сеть двухпроводной линии связи по стандарту RS-485, который обеспечивает надежную связь управляющей ЭВМ с локальными постами в условиях промышленных помех на удалении до 250м.

При модернизации в систему контроля и управления комплекса были включены 3 блока КРО, которые обеспечивают контроль по тритию 4 ионизационными камерами (ИК) в следующих точках: установка газоочистки, сборка насосов, зона пульта раннего предупреждения и зона размещения управляющих компьютеров системы автоматизированного контроля.

## 2.5. Программное обеспечение подсистемы КППС и дозиметрического контроля.

Программа подсистемы контроля и управления КППС обеспечивает контроль аналоговых (вакуум, температуры, давления) и дискретных (состояния вентилей, клапанов, датчиков давления воды) параметров комплекса.

Контролируемые аналоговые параметры отображаются в текстовой и графической форме в режиме реального времени. Графические окна для отображения аналоговых данных обладают широкими возможностями для просмотра и обработки динамических кривых (выбор кривых для просмотра, масштабирование, фильтрация и т.д.). Программа предусматривает непрерывную запись контролируемых параметров на жесткий диск компьютера.

Отображение состояний узлов комплекса и управление установкой осуществляется через активные графические мнемосхемы. Основная мнемосхема соответствует газовой схеме установки, на рис.8 представлен ее фрагмент.

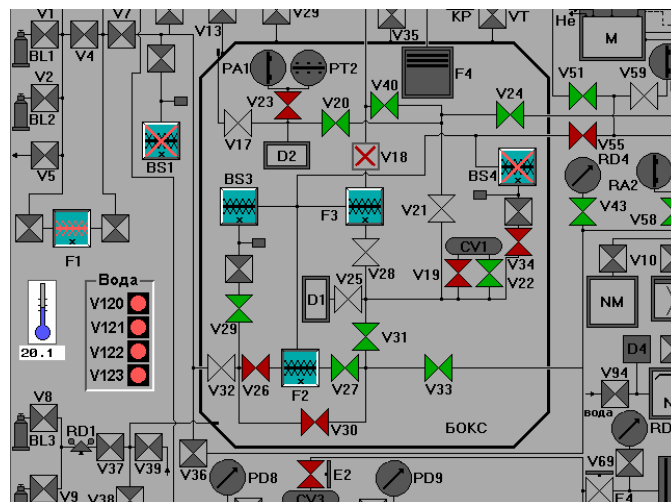


Рис.8. Графический интерфейс подсистемы КППС.

Программное обеспечение подсистемы радиационного мониторинга выполняет следующие функции:

- обеспечивает управление измерительными блоками контроля радиационной обстановки (установка режимов работы, установка верхнего и нижнего порогов для индикации состояния радиационной обстановки);
- осуществляет непрерывный контроль за состоянием радиационной обстановки и сохраняет регистрируемые параметры на жестком диске компьютера;
- визуально отображает состояние радиационной обстановки на графическом табло контроля (рис.9);
- осуществляет звуковое предупреждение персонала при возникновении нештатных ситуаций – превышении заданных порогов объемной активности.

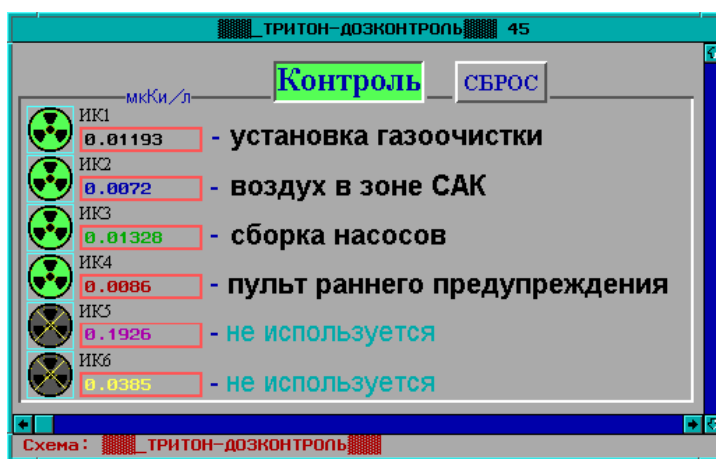


Рис.9. Табло контроля радиационной обстановки.

### 3. Подсистема контроля и управления мишени

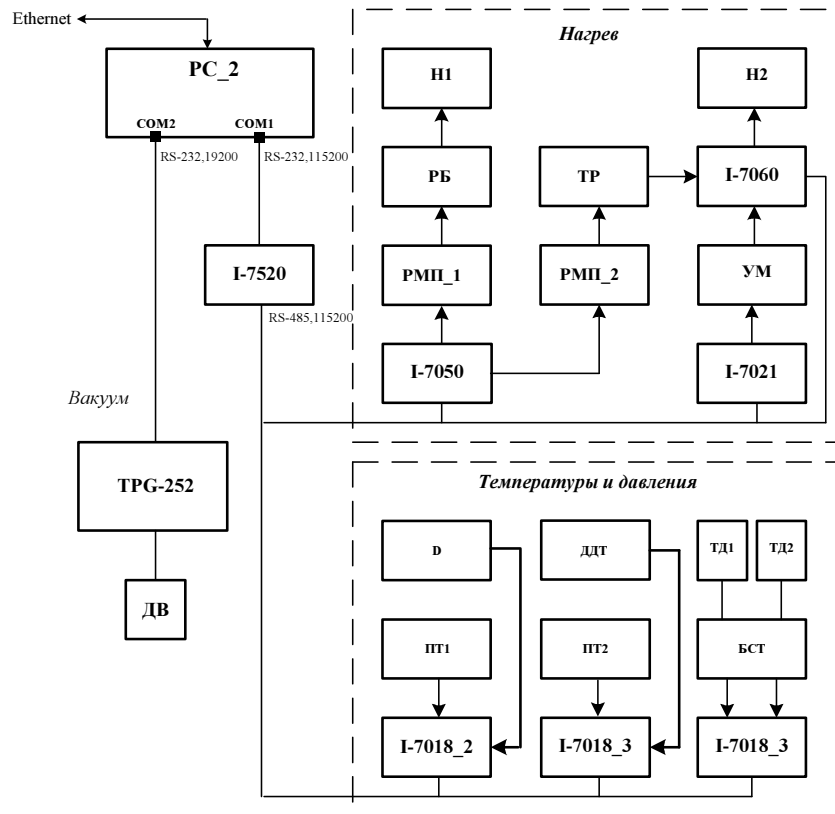
При изучении мюонного катализа в Н/Д/Т смесях необходимо проведение экспериментов в широком диапазоне температур (от криогенных до 1600 К) и давлений (до 160 МПа). Для этих целей используются мишени различной конструкции – в том числе жидко-тритиевая мишень, тритиевая мишень высокого давления, дейтериевая мишень высокого давления. Подсистема контроля и управления мишени обеспечивает работу со всеми типами мишеней. В ее функции входит:

- контроль вакуума;
- измерение высоких температур в 2 точках термометрическими датчиками;
- измерение высокого давления тензометрическим датчиком;
- измерение низкого давления датчиком типа САПФИР;
- измерение низких температур в 2 точках термодиодными датчиками;
- управление нагревателем с мощностью до 1 кВт;
- управление нагревателем малой мощности для работы при низких температурах;
- стабилизация температуры в рабочем объеме мишени.

Подсистема контроля и управления мишени базируется на персональном компьютере РС\_2, блок-схема подсистемы представлена на рис.10.

Вакуум контролируется датчиком фирмы Balzers, подключенным к компьютеру через двухканальный контроллер TPG-252. Высокое давление измеряется

тензометрическим датчиком, на который подается стабилизированное напряжение +12 В. Низкое давление измеряется датчиком типа САПФИР. Выходные сигналы тензометрических датчиков и датчиков типа САПФИР регистрируются модулями аналогового ввода типа I-7018. Для преобразования зарегистрированных напряжений в давления используются полиномиальные описания индивидуальных калибровок каждого датчика.



- |         |   |
|---------|---|
| Н1      | - нагреватель большой мощности, до 1 кВт                      |
| РМП     | - регулятор мощности полупроводниковый                        |
| РБ      | - реле блокировки нагревателя Н1                              |
| Н2      | - нагреватель малой мощности, до 300 Вт                       |
| УМ      | - усилитель мощности для нагревателя Н2                       |
| ТР      | - трансформатор   |
| ПТ      | - преобразователь термопарный                                 |
| ТД      | - термодиод   |
| ДДТ     | - датчик давления тензометрический                            |
| Д       | - датчик давления САПФИР                                      |
| ДВ      | - датчики вакуума фирмы Balzers                               |
| БСТ     | - блок стабилизаторов тока для термодиодов                    |
| I-7520  | - модуль преобразователя интерфейса RS-232/RS-485             |
| I-7018  | - 8-канальный модуль аналогового ввода                        |
| I-7060  | - многоканальный модуль релейного вывода                      |
| I-7021  | - 16-разрядный модуль аналогового вывода                      |
| I-7050  | - многоканальный модуль дискретного ввода-вывода              |
| TPG-252 | - 2-канальный контроллер для вакуумных датчиков фирмы Balzers |

Рис.10. Блок-схема подсистемы контроля и управления мишени.

Для нагревателя большой мощности Н1 используется канал управления, описанный ранее. Он включает преобразователь термопарный (ПТ1 или ПТ2), регулятор мощности РМП\_1 и реле блокировки Р1. Сигналы термопар регистрируются многоканальным модулем аналогового ввода I-7018\_1. Управление регулятором РМП\_1, управление релейной блокировкой и контроль тока обеспечиваются многоканальным модулем дискретного ввода/вывода I-7050.

Температура в рабочем объеме мишени регулируется нагревателем Н2, к стабильности температуры и точности ее измерения предъявляются высокие требования. Схема позволяет подключать нагреватель Н2 к выходу усилителя мощности УМ (усилитель постоянного тока), либо к выходу регулятора РМП\_2 через понижающий трансформатор.

Регулировка нагрева с помощью усилителя мощности обычно используется при криогенных температурах. Усилитель мощности рассчитан на выходную мощность до 40 Вт (выходное напряжение 20 В при максимальном токе до 2 А), на вход усилителя подается управляющее напряжение от 16-разрядного модуля аналогового вывода I-7021.

Два кремниевых термодиодных датчика обеспечивают измерение температуры в диапазоне от 2 К до 330 К (точность измерения  $\pm 1$  К в диапазоне 2-100 К и 1% выше 100 К). Термодиоды включены через стабилизаторы тока (ток  $10 \text{ мкА} \pm 0,05\%$ ), выходные напряжения на термодиодах измеряются многоканальным модулем аналогового ввода I-7018. При вычислении температуры используется сплайн-описание паспортной температурной характеристики кремниевого термодиода, типичный вид которой представлен на рис.11. Указанная аппаратура и программное обеспечение подсистемы позволяют стабилизировать температуру с относительной точностью  $\pm 0,05$  К.

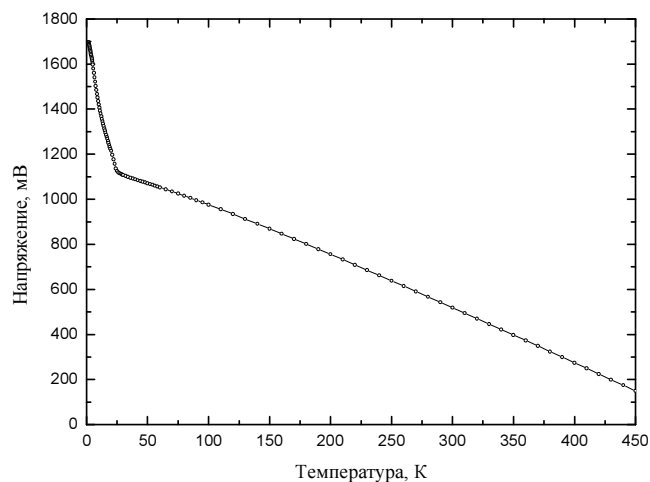


Рис.11. Типичная температурная характеристика термодиода.

Для получения на нагревателе Н2 большей мощности можно переключиться на стандартный канал управления нагревом на регуляторе мощности РМП\_2, работающем от сети переменного тока 220 В. Управление регулятором РМП\_2, управление релейной блокировкой и контроль тока обеспечиваются многоканальным модулем дискретного ввода/вывода I-7050. Переключение осуществляется программным образом с помощью модуля релейного вывода I-7060. Выбирая коэффициент

понижения напряжения трансформатора, можно в широких пределах менять максимальную мощность на нагревателе.

Программное обеспечение подсистемы мишени позволяет задавать и стабилизировать температуру нагрева рабочей области мишени, регистрировать вакуум, температуры и давления.

В качестве примера приведены экспериментальные температурные кривые охлаждения и стабилизации мишени (рис.12) и кривые изменения давления (рис.13) при ресурсных испытаниях тритиевой мишени высокого давления в феврале 2002 года.

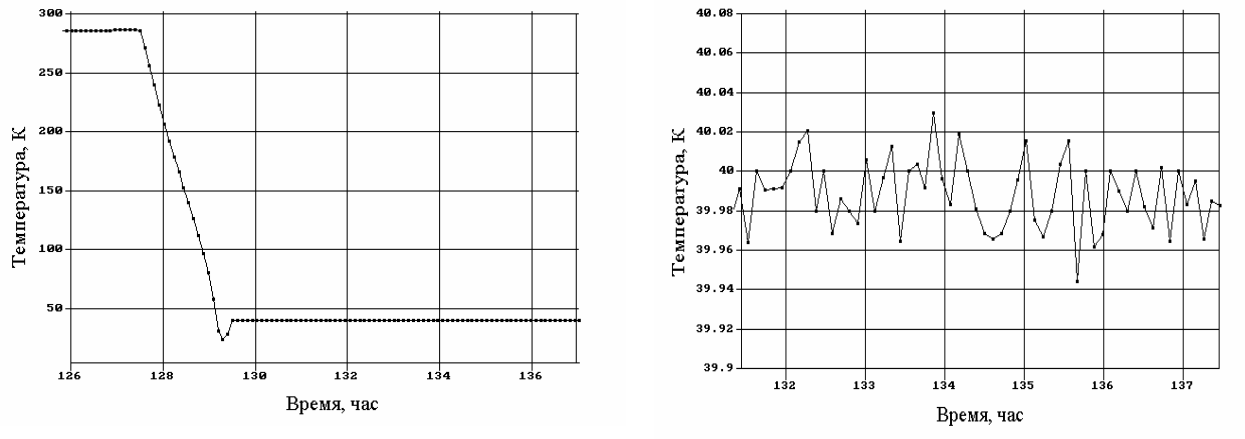


Рис.12. Кривая охлаждения и стабилизации температуры мишени.

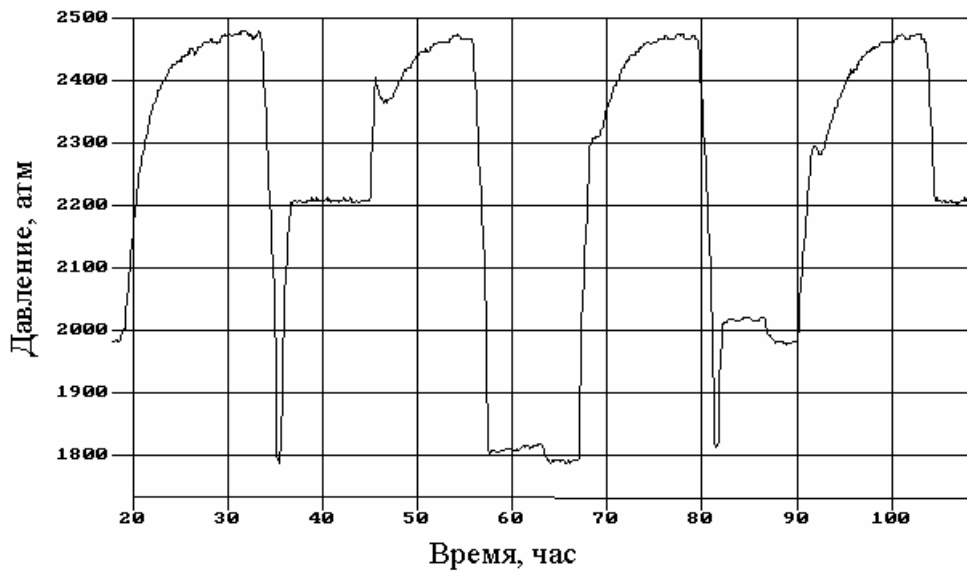


Рис.13. Измерение давления в мишени.

#### 4. Подсистема контроля молекулярного состава газовой смеси

Контроль молекулярного состава газовой смеси осуществляется детектором теплопроводности и малогабаритной ионизационной камерой объемом 5 см<sup>3</sup>. Разделение изотопов производится на хроматографической колонке длиной 3 м, работающей при температуре жидкого азота. В качестве газа носителя используется неон.

В начальном варианте системы контроля оцифровка выходного сигнала детектора теплопроводности осуществлялась аналого-цифровым преобразователем в КАМАК-стандарте. Для измерения тока ионизационной камеры использовались промышленные электрометрические вольтметры В7Э-42 и В7-57/1, подключаемые к компьютеру через интерфейс IEEE-488. Опыт работы с электрометрическими вольтметрами показал, что при регистрации быстро меняющегося тока (изменение тока на 2÷3 порядка при фронте 30 секунд) приводят к потерям данных на интервале до 10÷15 секунд. Кроме того, диапазоны вольтметров плохо "сшиваются" между собой.

По этим причинам подсистема контроля молекулярного состава была полностью модернизирована и переведена на современную электронную аппаратуру. Блок-схема измерений представлена на рис.14.

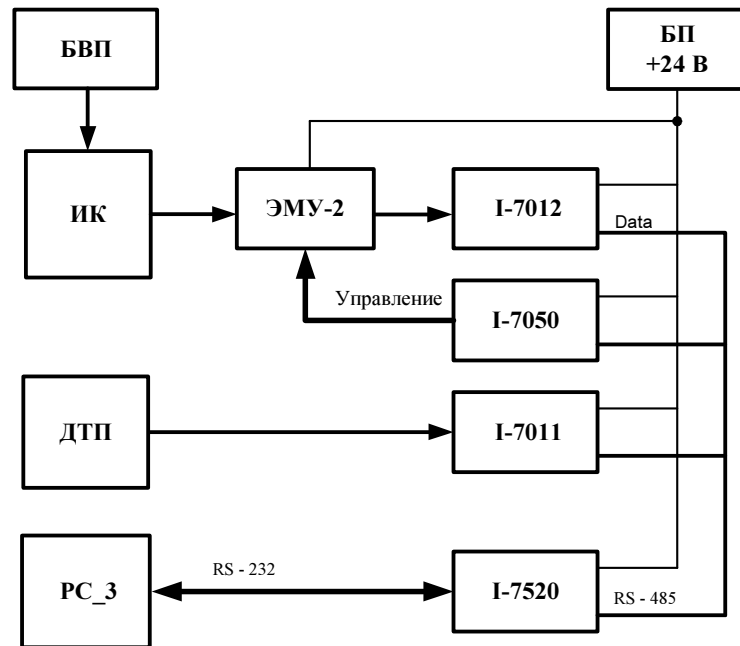
Подсистема контроля молекулярного состава смеси базируется на компьютере РС\_3. Оцифровка выходного сигнала детектора теплопроводности осуществляется модулем аналогового ввода I-7011 (диапазон измерений ±50 мВ) с частотой 10 раз в секунду и точностью 0,05%.

Для измерения тока ионизационной камеры был разработан линейный электрометрический усилитель с переключением диапазонов (ЭМУ-2). Усилитель предназначен для усиления токов от  $10^{-13}$  до  $10^{-5}$  А. Диапазон выходных напряжений усилителя от -5 до +5 В, предусмотрена защита усилителя от короткого замыкания по выходу. При разработке усилителя большое внимание уделялось вопросам экранировки и подавления помех.

Управления переключением 4-х диапазонов осуществляется от персонального компьютера через модуль дискретного вывода I-7050, а оцифровка выходного сигнала усилителя – модулем аналогового ввода I-7012 (диапазон измерений ±5 В). Все модули подсистемы подключаются к управляющему компьютеру двухпроводной линией связи через преобразователь интерфейса RS-232/RS-485 типа I-7520. Обмен данными выполняется со скоростью 115200 бод.

Уровень шума на самом чувствительном диапазоне усилителя составляет примерно  $2 \cdot 10^{-14}$  А. Соответствующая кривая измерения тока проточной ионизационной камеры при отсутствии радиоактивных примесей в газе приведена на рис.15. Шумовой сигнал симметричен относительно нулевой линии и это позволяет эффективно подавлять шум математическими методами. На этом же графике представлена экспериментальная кривая, сглаженная Фурье-фильтром с шириной окна в 1 с. Видно, что уровень шума при этом понизился примерно до  $3 \cdot 10^{-15}$  А.





- БВП - блок высоковольтного питания  
 ИК - проточная ионизационная камера  
 ЭМУ-2 - электрометрический усилитель с переключением диапазонов  
 БП - блок питания +24 В  
 I-7012 - модуль аналогового ввода  
 I-7050 - модуль дискретного вывода  
 ДТП - датчик теплопроводности  
 I-7011 - модуль аналогового ввода  
 I-7520 - модуль преобразователя интерфейса RS-232/RS-485

Рис.14. Блок-схема контроля молекулярного состава.

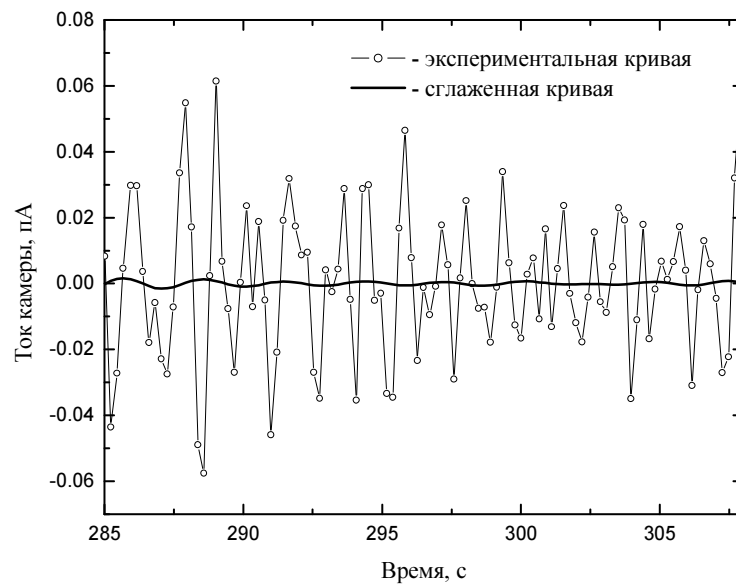


Рис.15. Шумовая характеристика измерительного канала.

Программа подсистемы анализа молекулярного состава газовой смеси обеспечивает управление сбором данных, обработку аппаратных кривых датчика теплопроводности и ионизационной камеры и расчет молекулярного состава смеси. В качестве примера на рис.16 представлены типичные аппаратные кривые для датчика теплопроводности и ионизационной камеры.

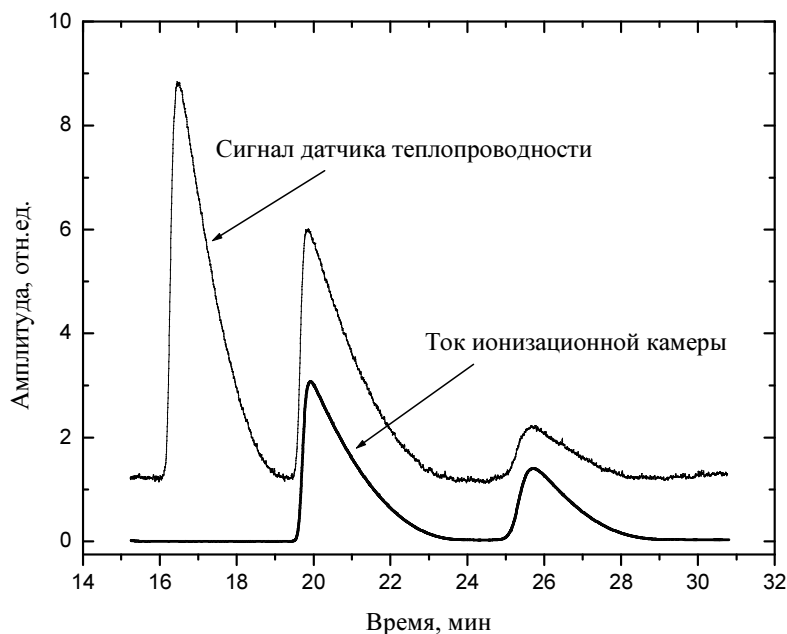


Рис.16. Аппаратурные кривые анализа молекулярной смеси.

## Заключение

Для исследования мюонного катализа ядерных реакций синтеза коллаборацией РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) и ОИЯИ (Дубна) в 1966 году создана установка "ТРИТОН", на которой с 1997 года регулярно проводятся физические эксперименты. Установка включает комплекс для подготовки газовой смеси со сменными мишенями, оснащенный автоматизированной системой контроля и управления.

В ходе подготовки к экспериментам 1999 года система автоматизации была существенно модернизирована, ей были переданы практически все функции контроля и управления комплексом подготовки газовой смеси, контроля и управления параметрами мишени, контроля состава газовой смеси и дозиметрического контроля.

Модернизированная система контроля и управления реализована на современной аппаратной базе, что позволило существенно повысить точность и надежность измерения физических и технологических параметров.

В ходе многочисленных физических экспериментов, проведенных на установке "ТРИТОН", программно-аппаратный комплекс системы контроля и управления показал хорошие эксплуатационные характеристики и высокую надежность.

Принятый подход к построению СКУ в виде распределенной сети интеллектуальных модулей и используемый программный пакет CRW-DAQ позволяют легко адаптироваться к изменениям в аппаратуре комплекса подготовки газовой смеси и мишеней, возникающим при подготовке к новым экспериментам: изменение типов

датчиков, введение новых датчиков, добавление новых источников с нагревателями и т.д.

Опыт, накопленный в процессе разработки и эксплуатации системы контроля и управления комплекса, был успешно применен при автоматизации установок, использующих тритиевые технологии – универсального исследовательского стенда для изучения явлений накопления и пропускания трития металлами и конструкционными материалами /10/ и комплекса тритиевой мишени для исследования экзотических нейтронно-избыточных ядер /11/.

Авторы выражают благодарность всем специалистам и сотрудникам ВНИИЭФ, принимавшим участие в разработке, изготовлении и испытаниях системы контроля и управления комплекса.

## Литература

1. А.А.Юхимчук, В.А.Апасов, Ю.И. Виноградов и др. Препринт РФЯЦ-ВНИИЭФ 64-98. 1998 г.; ПТЭ, 6 (1999) 17-23.
2. D.L. Demin, V.P. Dzheleпов, N.N. Grafov et al., *Hyperfine Interaction* 101/102(1996)583.
3. D.L. Demin, V.P. Dzheleпов, V.V. Filchenkov et al., *Hyperfine Interaction* 101/102(1996)591.
4. Н.Н. Графов, В.Г. Гребинник, Д.Л. Демин и др. Жидкотритиевая мишень, Препринт ОИЯИ Р13-97-243, Дубна, ОИЯИ, 1977; ПТЭ 1(1999)21; D.L. Demin, V.P. Dzheleпов, N.N. Grafov et al., *Hyperfine Interaction* 119(1999)349.
5. В.В. Перевозчиков, А.А. Юхимчук, Н.С. Ганчук и др. Тритиевая мишень высокого давления. Препринт ОИЯИ Д15-98-107. Дубна, 1998. 10с.; ПТЭ, 1999, №1, с.28-33; V.V. Perevozchikov, A.A. Yukhimchuk, N.S. Ganchuk et al., *Hyperfine Interactions* 118(1999)353-355.
6. V.V. Perevozchikov, A.A. Yukhimchuk, Yu.I. Vinogradov et al., Deuterium high pressure target. Preprint of the JINR, D13-2001-118, Dubna, 2001.
7. П.В. Ширнин, Ю.И. Виноградов, А.Н. Голубков и др. Количественный анализ изотопов водорода газовым тритиевым радиохроматографом РХТ-2. Препринт РФЯЦ-ВНИИЭФ, хх-2002. Саров, 2002. 22с.
8. A.N. Golubkov, A.A. Yukhimchuk, *Journal of the Moscow physical society*, Vol. 9, № 3, 1999, p. 223.
9. В.Г. Клевцов, В.Н. Лобанов, Ю.А. Хабаров, А.А. Юхимчук. Диффузионная очистка изотопов водорода палладиевыми фильтрами. Сбор. трудов Международного семинара "Взаимодействие водорода с конструкционными материалами. IHISM-01", 02-06 апреля 2001г., Саров, с.59. Саров, 2001.
10. Ю.И. Виноградов, А.В. Курякин, В.С. Арюткин и др. Автоматизированная система контроля, управления и сбора данных стенда "Прометей". Сбор. трудов Международного семинара "Взаимодействие водорода с конструкционными материалами. IHISM-01", 02-06 апреля 2001г., Саров, с.103. Саров, 2001.
11. Ю.И. Виноградов, В.С. Арюткин, А.В. Курякин, и др. Система контроля и управления комплекса тритиевой мишени для исследования экзотических нейтронно-избыточных ядер. Сбор. трудов 51 совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. 3-8 сентября 2001г., Саров, с.277. Саров, 2001.