

# Устный доклад по диссертации

## 1. Тема диссертации

Здравствуйтесь, уважаемые коллеги. Вашему вниманию предлагается диссертация на тему: **Автоматизация физических экспериментов на тритиевых комплексах исследовательских установок «ТРИТОН», «АКУЛИНА» и «ПРОМЕТЕЙ».**

## 2. Актуальность

Изотопы водорода широко применяются в фундаментальной и прикладной науке и технике. Рассматриваемые в диссертации установки связаны этими применениями. На установке ТРИТОН в ЛЯП исследуется мюонный катализ ядерных реакций синтеза изотопов водорода. На установке АКУЛИНА в ЛЯР изучаются легкие нейтронно-избыточные ядра. На стенде низкого давления ПРОМЕТЕЙ в ВНИИЭФ изучается взаимодействие изотопов водорода с металлами и конструкционными материалами.

Важнейшей частью этих установок являются тритиевые комплексы, работу которых обеспечивал ВНИИЭФ. Эти комплексы включают дейтериевые и тритиевые мишени высокого давления, жидко-тритиевые мишени, систему подачи ионов водорода в ионный источник циклотрона, а также сложные газовакуумные комплексы их обеспечения.

Высокая сложность тритиевых комплексов и требования безопасности при работе с тритием делают актуальной задачу автоматизации исследовательских установок.

## 3. Цели и задачи

Были поставлены цели – автоматизации физических экспериментов на установках ТРИТОН, АКУЛИНА, ПРОМЕТЕЙ.

Для их достижения были решены такие задачи:

1. Создана инструментальная программная среда для разработки высоконадежных автоматизированных систем, работающих с изотопами водорода
2. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для мишенного комплекса на установке ТРИТОН, а также для системы подачи изотопов водорода в ионный источник циклотрона и комплекса жидко-третиевой мишени на установке АКУЛИНА
3. Решена задача автоматизации исследований на стенде ПРОМЕТЕЙ для исследования взаимодействия изотопов водорода с металлами

#### **4. Практическая ценность**

Инструментальный пакет использовался для автоматизации установок ТРИТОН, АКУЛИНА, ПРОМЕТЕЙ. Кроме того, он использовался для изучения диффузии водорода в металлах в НИИ Физики Санкт-Петербургского университета, а также для автоматизации системы охлаждения детектора PHOS в эксперименте ALICE в ЦЕРНе.

Автоматизированные комплексы ТРИТОН и АКУЛИНА позволили провести исследования мюонного катализа ядерных реакций синтеза в широком диапазоне параметров, а также получить и изучить легкие нейтронно-избыточные ядра.

Автоматизированный стенд ПРОМЕТЕЙ позволил провести исследования сверхпроницаемости, проникновения и накопления изотопов водорода в металлах и конструкционных материалах.

Опыт автоматизации установок обобщен в ряде публикаций и может быть использован для автоматизации других установок, работающих с изотопами водорода.

#### **5. Научная новизна**

Создана оригинальная инструментальная программная среда разработки, дающая новые возможности для автоматизации физических исследований.

Впервые созданы автоматизированные комплексы уникальных тритиевых мишеней на установках ТРИТОН и АКУЛИНА, позволяющие в условиях неспециализированных лабораторий безопасно работать с большими количествами трития.

Автоматизированный тритиевый комплекс установки ТРИТОН позволил впервые изучить мюонный катализ в широком диапазоне параметров.

Автоматизированный тритиевый комплекс установки АКУЛИНА дал новые возможности для изучения нейтронно-избыточных легких ядер.

Автоматизированный стенд ПРОМЕТЕЙ позволил впервые подтвердить явление сверхпроницаемости для трития и измерить скорость мембранной откачки трития через ниобиевые и ванадиевые мембраны.

## **6. Личный вклад автора**

Автором проанализированы требования к программному обеспечению тритиевых комплексов исследовательских установок.

Создан программный пакет CRW-DAQ – инструментальная среда для разработки автоматизированных систем.

Решены методические вопросы, созданы алгоритмы и программное обеспечение для автоматизации тритиевых комплексов установок ТРИТОН, АКУЛИНА и ПРОМЕТЕЙ.

Автор принимал участие в подготовке и проведении экспериментов на установках ТРИТОН, АКУЛИНА и подготовке экспериментов на стенде ПРОМЕТЕЙ.

## **7. На защиту выносятся**

1. Инструментальная программная среда (пакет CRW-DAQ), дающая качественно новые возможности для разработки высоконадежных автоматизированных систем контроля и управления газовакуумными комплексами исследовательских установок, работающих с изотопами водорода, включая тритий.

2. Методические решения и программное обеспечение для автоматизации уникальных тритиевых мишенных комплексов на установках ТРИТОН и АКУЛИНА, созданных для изучения мюонного катализа ядерных реакций синтеза в смесях изотопов водорода и изучения нейтронно-избыточных легких ядер, образующихся при взаимодействии пучка ионов трития с тритиевой мишенью.
3. Система автоматизации физических измерений и управления на установке низкого давления ПРОМЕТЕЙ, предназначенной для изучения сверхпроницаемости, накопления и пропускания трития в металлах и конструкционных материалах.

## **8. Апробация**

Материалы диссертации докладывались на семинарах и конференциях в Сарове, Дубне, Снежинске, Санкт-Петербурге, в Японии и Германии.

## **9. Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 20 работах, в том числе 16 в реферируемых ВАК журналах. 18 статей вошло в сборник Изотопы Водорода под редакцией доктора Юхимчука.

## **10. Тритиевые комплексы установок**

Особенностями тритиевых комплексов исследовательских установок являются – уникальность мишенных комплексов, работа с большим количеством трития в неспециализированной лаборатории, частая модификация исследовательских установок.

Отсюда возникают требования - обеспечить высокую надежность, длительную безотказную работу, высокую адаптивность к меняющимся условиям, непрерывный радиометрический контроль, систему блокировок и аварийной сигнализации, снижение влияния «человеческого фактора»,

радиохроматографию и изотопный анализ газовых смесей изотопов водорода.

Для обеспечения этих требований на всех установках нужна общая программная база. Этой базой стал созданный автором инструментальный пакет.

## **11. Пакет CRW-DAQ: идеи**

В разработку пакета закладывались идеи: унификации программного обеспечения тритиевых комплексов, отказоустойчивого управления распределенными сетевыми системами в реальном времени, параллелизма, самодостаточности, высокой адаптивности, обеспечения Online и Offline обработки данных, самодиагностики, учета специфики предметной области (то есть тритиевых комплексов).

## **12. Пакет CRW-DAQ**

Как реализация этих идей, начиная с 1998 года, был создан и поддерживается пакет CRW-DAQ, зарегистрированный в государственном реестре Российской Федерации. Пакет имеет развитый графический интерфейс, показанный на рисунке.

## **13. CRW-DAQ: структура ПО АСКУ**

Программное обеспечение автоматизированных систем, созданных в инструментальном пакете, имеет двухкомпонентную структуру.

Базовое программное обеспечение – общее для всех установок – включает общие библиотеки и средства online и offline обработки, среду разработки и исполнения, встроенные языки прикладного программирования.

Прикладное программное обеспечение – индивидуальное для каждой установки – описывает конфигурацию, ресурсы и алгоритмы конкретной автоматизированной системы, используя инструментарий, предоставленный базовым программным обеспечением.

## **14. CRW-DAQ: среда разработки**

Пакет CRW-DAQ содержит инструментальную среду, обеспечивающую полный цикл разработки и поддержки прикладного программного обеспечения для автоматизированных систем, включая средства программирования (интерпретаторы и компиляторы языков высокого уровня), а также средства редактирования, диагностики и отладки.

Особенно хочется отметить язык DAQ Pascal, который основан на концепции виртуальных машин и обеспечивает создание отказоустойчивых прикладных программ управления установками.

## **15. CRW-DAQ: Виртуальные машины**

Виртуальные машины DAQ Pascal обеспечивают исполнение кода прикладных программ, параллелизм (многопоточный режим работы), отказоустойчивость прикладных программ, жесткий контроль ресурсов, адаптивность (возможность компиляции «на лету»), а также облегчают прикладное программирование.

## **16. CRW-DAQ: Параллелизм**

Для пакета CRW-DAQ характерна высокая степень параллелизма с четким разделением потоков и процессов по функциям, приоритетам и частоте опроса, с контролем частоты опроса, диагностикой повисания потоков, сторожевым таймером. При этом параллельные потоки и процессы хорошо защищены с помощью виртуальных машин и обмениваются друг с другом данными с помощью механизма сообщений.

## **17. CRW-DAQ: Драйверы аппаратуры**

Для работы с аппаратурой в составе локальных и распределенных сетевых систем в пакете CRW-DAQ созданы библиотеки и драйверы, включающие большой набор типов устройств, аппаратных интерфейсов и протоколов связи.

Особенно хотелось бы отметить протокол DIM, созданный в ЦЕРН для разработки многомашинных систем управления экспериментами в реальном времени. Эта сетевая технология была интегрирована в пакет в ходе работ по автоматизации детектора PHOS в ЦЕРН и теперь используется в большинстве созданных с его помощью систем управления. Это хороший пример пользы от сотрудничества с открытыми лабораториями мира.

## **18. CRW-DAQ: Средства обработки**

Для online и offline обработки данных созданы библиотеки, включающие большой набор средств анализа, фильтрации, сглаживания данных, калибровки измерительных каналов, сортировки и сжатия данных online. Эти средства доступны как в автоматическом, так и в интерактивном режиме обработки.

## **19. CRW-DAQ: сравнение**

Каждый пакет имеет свои достоинства и недостатки. Здесь дается краткое сравнение пакета с другими. Пакет имеет ряд уникальных свойств, таких как средства калибровки каналов, отказоустойчивые виртуальные машины и компиляция «на лету». Хочется отметить практичность пакета – простота освоения, наличие большого числа примеров и шаблонов для создания новых систем, возможность командной разработки и поддержки систем.

## **20. CRW-DAQ: применение**

Пакет применялся для автоматизации тритиевых комплексов установок ТРИТОН, АКУЛИНА в ОИЯИ, на стенде ПРОМЕТЕЙ и на других установках ВНИИЭФ, в институтах Петербурга и Москвы, а также в эксперименте ALICE в ЦЕРН.

## **21. ТРИТОН: $\mu$ -катализ**

На установке ТРИТОН изучался мюонный катализ ядерных реакций синтеза изотопов водорода, уникальной особенностью которого является зависимость течения ядерной реакции от температуры, плотности и состава H/D/T смеси. Цель установки - изучение зависимости мюонного катализа от этих факторов в широком диапазоне параметров.

## **22. ТРИТОН: уникальные D/T мишени**

Для этого в ВНИИЭФ были созданы уникальные тритиевые мишени, обеспечивающие в условиях неспециализированной лаборатории безопасную работу с большим количеством жидкого и газообразного трития при низких (от 20 К) и высоких (до 800 К) температурах, высоких давлениях (до 2500 бар).

Для обеспечения функционирования мишени необходимы также: комплекс подготовки газовой смеси, система анализа газового состава смеси и система радиационного контроля по тритию. Работа комплекса такого уровня сложности невозможна без автоматизированной системы, которая тем самым является важным компонентом этого сложного физического прибора.

## **23. ТРИТОН: общий вид КПГС**

Здесь показан общий вид мишени и комплекса для её подготовки.

## **24. ТРИТОН: создана АСКУ**

Для управления мишенным комплексом установки ТРИТОН была создана автоматизированная система, которая обеспечивает управление термодесорбционными источниками изотопов водорода, подготовку и анализ H/D/T смеси, подачу смеси в мишень, измерение и стабилизацию температуры и давления мишени в широком диапазоне условий, утилизацию отработавшей смеси, радиационный контроль, аварийные блокировки и сигнализацию, протоколирование измерений.

## **25. ТРИТОН: мнемосхема КПГС**

Программное обеспечение тритиевого комплекса установки ТРИТОН было создано в среде инструментального пакета. Для управления установкой созданы мнемосхемы, максимально приближенные по внешнему виду к газовой схеме комплекса.

## **26. ТРИТОН: работа с источниками**

Тритий хранится в металлгидридных термодесорбционных источниках, которые при нагреве могут развивать высокое давление. Для управления источниками разработана многоканальная система управляемых нагревателей, обеспечивающая нагрев до 1000 К с точностью стабилизации  $\pm 1$  К, имеющая за счет использования программного режима ШИМ высокий КПД и низкую стоимость. Обеспечена отказоустойчивость и система блокировок по температуре, давлению и объемной активности.

## **27. ТРИТОН: отказоустойчивость**

Отказоустойчивость управления источниками обеспечена структурой системы управления и рядом специальных мер: дублирование управления, самодиагностика, автономность подсистем, изоляция сбоев, техника безопасного программирования, иерархия управления, а также система симуляции, которая позволяет проверить весь тракт управления, подменив реальную аппаратуру симулятором.

## **28. ТРИТОН: автоматизация мишени**

Система автоматизации мишени обеспечила измерение температуры и давление мишени в широком диапазоне параметров, а также высокоточную стабилизацию температуры жидко-тритиевой мишени и тритиевой мишени высокого давления. На рисунке показан пример стабилизации жидко-тритиевой мишени с точностью  $\pm 0,1$  К.

## **29. ТРИТОН: система анализа состава газовой смеси**

На базе радиохроматографа (включающего катарометр и ионизационную камеру) была разработана система для молекулярного и изотопного анализа состава газовых смесей изотопов водорода. Программное обеспечение для регистрации и расчета состава выполнена автором в инструментальном пакете. На рисунке показан пример расчета.

## **30. ТРИТОН: физ.результаты на D/T**

Автоматизированный мишенный комплекс обеспечил проведение серии около 80 экспериментов на D/T смеси и измерение основных физических параметров мишени – температуры, давления и изотопного состава смеси.

На рисунке показана область измерения по температуре и плотности. В каждой точке диаграммы было 5-6 экспозиций по 6-12 часов с разными концентрациями трития, плюс 6-12 часов подготовки газовой смеси. В результате была изучена зависимость числа циклов мюонного катализа от температуры, плотности и состава D/T смеси.

## **31. ТРИТОН: выводы**

Автоматизированная система обеспечила функционирование мишенного комплекса и измерение основных физических параметров мишени.

Полученные на установке результаты имеют важное научное и практическое значение.

## **32. АКУЛИНА: задача**

На установке АКУЛИНА изучались легкие нейтронно-избыточные ядра, получаемые при взаимодействии пучка ионов трития с тритиевой мишенью.

В задачи ВНИИЭФ входило обеспечение подачи изотопов водорода в ионный источник циклотрона и обеспечение жидко-тритиевой мишени.

### **33. АКУЛИНА: система подачи изотопов водорода**

Задачей системы подачи изотопов водорода является обеспечение регулируемой с помощью тока натекателей подачи изотопов водорода в ионный источник циклотрона, а также управление источниками и ловушками изотопов водорода.

### **34. АКУЛИНА: внешний вид СПИВ**

Система подачи расположена в сильном электромагнитном поле циклотрона, под потенциалом 15 кВ и требует дистанционного управления.

### **35. АКУЛИНА: АСКУ СПИВ**

Для дистанционного управления системой подачи изотопов водорода разработана автоматизированная система. Трудные условия эксплуатации потребовали принятия специальных мер для обеспечения высоковольтной изоляции аппаратуры.

### **36. АКУЛИНА: ПО АСКУ СПИВ**

Программное обеспечение, созданное в инструментальном пакете, обеспечило удаленное управление током натекателей, температурой нагрева металлгидридных источников изотопов водорода и ловушек для утилизации трития, регистрацию состояния вентилях, температур и давлений в газовой системе, отображение и архивацию данных.

С помощью системы подачи изотопов в ионный источник циклотрона был получен необходимый для проведения исследований пучок ионов трития.

### **37. АКУЛИНА: уникальная ЖТ мишень**

Для проведения исследований на установке во ВНИИЭФ создана уникальная тонкостенная жидко-третиевая мишень, имеющая два рубежа защиты (третий рубеж обеспечивает реакционная камера).

## **38. АКУЛИНА: мишенный комплекс**

Для обеспечения комплекса газовой подготовки и наполнения мишени, стабилизации её температуры, утилизации трития и радиационного контроля по тритию создана автоматизированная система, без которой функционирование мишени невозможно.

Автоматизированная система измеряет температуры и давления в мишенном комплексе, управляет клапанами, насосами, нагревателями источников и ловушек изотопов водорода, измеряет температуру мишени и стабилизирует её с помощью нагревателя, контролирует объемную активность по тритию.

## **39. АКУЛИНА: вид мишенного комплекса**

Здесь показан внешний вид мишенного комплекса.

## **40. АКУЛИНА: ПО АСКУ**

Программное обеспечение, созданное в инструментальном пакете, обеспечивает управление мишенным комплексом, измерение и высокоточную стабилизацию температуры мишени, радиометрический контроль, ведение протокола измерений, отображение измеряемых данных. На рисунке показан типичный вид кривой охлаждения и стабилизации температуры мишени с точностью  $\pm 0,1$  К.

## **41. АКУЛИНА: выводы**

Создана автоматизированная система, обеспечивающая функционирование системы подачи изотопов водорода и мишенного комплекса установки АКУЛИНА.

На ней регулярно проводятся исследования нейтронно-избыточных легких ядер.

С помощью системы подачи и мишенного комплекса получены ядра  $^4\text{H}$ ,  $^5\text{H}$  и изучены их резонансные уровни, получены и опубликованы новые научные результаты.

## **42. Установка ПРОМЕТЕЙ**

Установка ПРОМЕТЕЙ в ВНИИЭФ для исследования взаимодействия изотопов водорода с металлами включает технологическую и исследовательскую часть, а также автоматизированную систему управления.

## **43. ПРОМЕТЕЙ: 2 исслед. ячейки**

Исследовательская часть включает две ячейки.

Ячейка для исследования проникновения и накопления изотопов водорода в металлах и конструкционных материалах, включает входной и выходной объем, изучаемую мембрану с нагревателем, атомизатор, масс-спектрометр для регистрации потока изотопов водорода сквозь мембрану.

Ячейка для исследования сверхпроницаемости изотопов водорода сквозь металлические мембраны включает входной и выходной объем с водяным охлаждением, мощные атомизаторы с температурой до 2300 К, изучаемую цилиндрическую мембрану, а также масс-спектрометр для регистрации потока изотопов водорода сквозь мембрану.

## **44. ПРОМЕТЕЙ: задачи АСКУ**

В задачи АСКУ входит: получение изотопов водорода из металлогидридных источников, их утилизация на ловушки, подготовка газовой смеси, анализ её изотопного состава. Управление клапанами, насосами, атомизаторами измерительных ячеек. Измерение основных технологических и физических параметров (температур, давлений, потоков изотопов водорода сквозь мембраны). Обеспечение системы радиометрического контроля, аварийной блокировки и сигнализации, ведение протокола измерений и визуализация данных.

## **45. ПРОМЕТЕЙ: ПО для АСКУ**

Программное обеспечение для АСКУ разработано с помощью инструментального пакета, здесь показан вид графического интерфейса.

## **46. ПРОМЕТЕЙ: что сделано**

Автоматизированная система обеспечила измерение физических и технологических параметров, управление технологическим оборудованием и исследовательскими ячейками. Созданы алгоритмы управления, драйверы аппаратуры, обеспечен радиометрический контроль, система блокировок и сигнализации, ведение протокола измерений, визуализация данных и удаленное наблюдение.

## **47. ПРОМЕТЕЙ: методика МКИ**

На стенде реализована методика МКИ (метод концентрационных импульсов). Во входной объем накачивается смесь изотопов водорода. С помощью управляемого атомизатора создается серия импульсов концентрации атомарного водорода с периодом порядка 400 секунд. В выходном объеме регистрируется функция отклика – поток изотопов водорода через мембрану. Функция отклика разлагается в ряд Фурье, строится её фазово-частотная характеристика. По этой характеристике с помощью подгонки параметров по МНК определяются кинетические параметры транспорта водорода сквозь изучаемую мембрану. Измерительная часть МКИ обеспечена ВНИИЭФ. Банк моделей для подгонки разработан в НИИФ СПбГУ.

## **48. ПРОМЕТЕЙ: выводы**

Под управлением созданной автоматизированной системы на стенде ПРОМЕТЕЙ с 2001 года регулярно проводятся исследования по изучению сверхпроницаемости изотопов водорода через металлические мембраны и взаимодействия водорода с металлами.

Это позволило в опытах по изучению сверхпроницаемости изотопов водорода через ниобиевые и ванадиевые мембраны впервые подтвердить явление сверхпроницаемости для трития, измерить скорость откачки мембранного насоса на мембранах из Nb и V, показать возможность эффективного разделения изотопов водорода от гелия и остаточных газов. Полученные с помощью автоматизированного стенда ПРОМЕТЕЙ результаты имеют важное научное и практическое значение, например, для обеспечения топливного цикла термоядерного реактора.

## **49. ОБЩИЙ ВЫВОД**

1. Создана инструментальная система для автоматизации исследовательских установок
2. Автоматизированы тритиевые мишенные комплексы ТРИТОН, АКУЛИНА в ОИЯИ
3. Автоматизированы физические измерения на тритиевом комплексе ПРОМЕТЕЙ в ВНИИЭФ

**Список публикаций по теме диссертации имеется в конце автореферата.**