

АВТОМАТИЗАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТРИТИЕВЫХ КОМПЛЕКСАХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ УСТАНОВОК

«ТРИТОН», «АКУЛИНА» И «ПРОМЕТЕЙ»

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

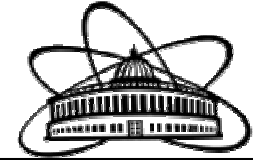
Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Соискатель:

Курякин Алексей Валерьевич

Научный руководитель: д.ф.м.н.

Виноградов Юрий Иванович



Изотопы Водорода

НАУКА

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

- μ -катализ ЯР (МСФ)
- Легкие экзотические ядра

ПРИКЛАДНАЯ

- Сверхпроницаемость ИВ через металл. мембраны
- Взаимодействие ИВ с металлами и КМ

ТЕХНИКА

- Энергетика
- Материаловедение
- Безопасность АЭС

Установки

ТРИТОН (ЛЯП ОИЯИ)

- Мишени: ЖТМ, ТМВД, ДМВД
- Тритиевый комплекс

АКУЛИНА (ЛЯР ОИЯИ)

- Система подачи H,D,T в ионный источник У-400М
- Жидко-тритиевая мишень

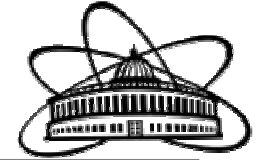
ПРОМЕТЕЙ (ВНИИЭФ)

- 2 исследовательские ячейки
- Тритиевый комплекс

ВНИИЭФ: обеспечивал работы с тритием

Сложность + тритий → актуальность задачи автоматизации исследовательских установок.

Цели и задачи



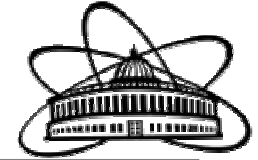
Поставлены цели:

Автоматизация физических экспериментов на установках ТРИТОН, АКУЛИНА и ПРОМЕТЕЙ, предназначенных для проведения фундаментальных и прикладных исследований с использованием изотопов водорода (в том числе трития) в ОИЯИ и РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Решены задачи:

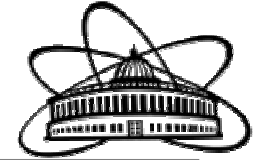
1. Создана **инструментальная программная среда** для разработки высоконадежных распределенных автоматизированных систем контроля и управления (АСКУ) физическими экспериментами на исследовательских установках, оснащенных газовакуумными комплексами для работы с изотопами водорода, включая тритий.
2. Разработаны **алгоритмы и программное обеспечение** (ПО) для систем сбора данных и управления тритиевых комплексов и мишеней установок, предназначенных для проведения экспериментов по мюонному катализу ядерных реакций (ТРИТОН) и экспериментов по изучению легких нейтронно-избыточных ядер (АКУЛИНА) на ускорителях ОИЯИ.
3. Решена задача **автоматизации исследований** на стенде ПРОМЕТЕЙ, предназначенном для изучения взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами в РФЯЦ-ВНИИЭФ, а также проводимых на нем **физических измерений**.

Практическая ценность



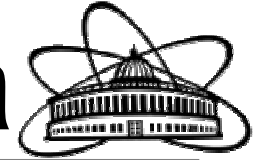
- Инструментальный пакет (**CRW-DAQ**) использовался для разработки программного обеспечения автоматизированных тритиевых комплексов установок **ТРИТОН**, **АКУЛИНА** и **ПРОМЕТЕЙ**, а также для автоматизации исследований диффузии водорода в металлах в **НИИФ СПбГУ** и **СПБГУТ** и управления системой охлаждения и температурной стабилизации спектрометра фотонов **PHOS** в эксперименте **ALICE** на **LHC** в **ЦЕРН**.
- Автоматизированные тритиевые комплексы установок **ТРИТОН** и **АКУЛИНА** позволили провести исследования процессов **мюонного катализа** в смесях изотопов водорода в широком диапазоне температур, давлений и концентраций, получить **легкие нейтронно-избыточные ядра** ^4H и ^5H и изучить их характеристики.
- На автоматизированном стенде **ПРОМЕТЕЙ** проведены исследования **сверхпроницаемости** изотопов водорода через металлы, исследования явлений **накопления и пропускания трития** металлами и конструкционными материалами.
- **Программное обеспечение** и **методический опыт**, накопленные при создании автоматизированных тритиевых комплексов установок **ТРИТОН**, **АКУЛИНА** и **ПРОМЕТЕЙ**, **могут использоваться** при решении задач автоматизации других экспериментальных установок, в которых применяются ИВ.

Научная новизна



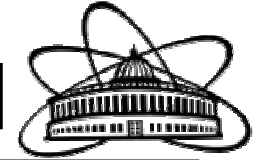
1. Создана **оригинальная инструментальная программная среда** (пакет **CRW-DAQ**), дающая качественно новые возможности для автоматизации научных исследований с изотопами водорода.
2. Впервые созданы автоматизированные комплексы уникальных тритиевых мишеней, обеспечивающие в условиях **неспециализированных** лабораторий безопасное проведение экспериментов с большими количествами трития (установки ТРИТОН, АКУЛИНА и ПРОМЕТЕЙ).
3. Автоматизированный тритиевый комплекс установки ТРИТОН позволил в экспериментах с D/T-смесями **впервые** получить параметры цикла мюонного катализа ЯР синтеза в широком диапазоне температур, плотностей и концентраций трития.
4. Автоматизированный тритиевый комплекс установки АКУЛИНА предоставил **новые возможности** для изучения легких нейтронно-избыточных ядер на пучках ионов трития и тритиевых мишенях на циклотроне У-400М в ЛЯР ОИЯИ.
5. Автоматизированный стенд ПРОМЕТЕЙ позволил **впервые** экспериментально **подтвердить** явление сверхпроницаемости для трития и измерить скорость мембранной откачки трития через ниобиевые и ванадиевые мембраны.

Личный вклад автора



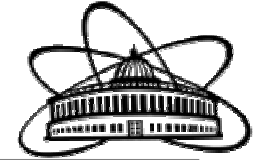
- ❑ Проанализированы **требования** к программному обеспечению для автоматизации тритиевых комплексов исследовательских установок.
- ❑ Создан программный пакет **CRW-DAQ** (~ 140.000 строк кода) – **инструментальная среда** для разработки высоконадежного ПО для их автоматизации.
- ❑ Решены **методические вопросы** автоматизации физических измерений, разработаны **алгоритмы и программное обеспечение** для высоконадежного управления мишенным комплексом установки ТРИТОН, системой подачи изотопов водорода в ионный источник циклотрона У-400М, комплексом жидко-тритиевой мишени установки АКУЛИНА и исследовательским стендом ПРОМЕТЕЙ.
- ❑ Автор участвовал в **подготовке и проведении физических экспериментов**, выполненных на установках ТРИТОН и АКУЛИНА, а также в подготовке экспериментов на стенде ПРОМЕТЕЙ.

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** для металлов и конструкционных материалов.**

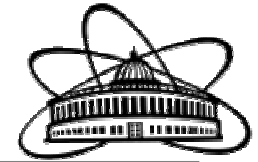
Апробация



Материалы диссертации докладывались:

- на семинарах во ВНИИЭФ (г. Саров), ОИЯИ (г. Дубна);
- на 1, 2 и 3 международных семинарах "Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами (IHISM)", Саров'2001, Саров'2004, Санкт-Петербург'2007;
- международном Уральском семинаре "Радиационная физика металлов и сплавов", Снежинск'2003;
- на 1 и 7 международных конференциях "Мюонный катализ и связанные экзотические атомы ($\mu\text{CF-01}$, $\mu\text{CF-07}$)", Япония, Шимода'2001, Дубна'2007;
- международной конференции по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (ЯДРО-2001), Саров'2001;
- международных симпозиумах по экзотическим ядрам, Байкал'2001, Ладога'2004;
- международной конференции по тритиевой науке и технологиям (TRITIUM), Германия, Баден-Баден'2004.

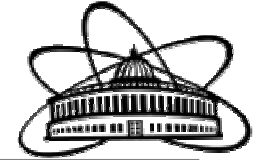
Публикации



Материалы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в **20** печатных работах, в том числе **16** в реферируемых журналах:

- Приборы и техника эксперимента – **1,**
- ЖЭТФ – **2,**
- Ядерная Физика – **1,**
- Известия РАН – **1,**
- ВАНТ – **4,**
- Материаловедение – **2,**
- Nuclear Instruments and Methods – **2,**
- Fusion Science and Technology – **2,**
- Physics Letters B – **1.**

18 статей вошло в сборник **ИЗОТОПЫ ВОДОРОДА.**⁹



Особенности

- Уникальность** тритиевых мишенных комплексов
- Работа с большими количествами трития в условиях **неспециализированной** (по тритию) лаборатории
- Исследовательские установки, часто модифицируются

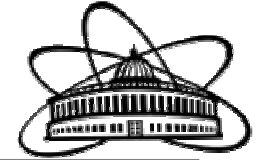
Требования

- Высокая надежность**; длительная безотказная работа
- Адаптивность** к меняющимся условиям экспериментов
- Непрерывный радиометрический контроль** по тритию
- Система блокировок и оповещения персонала
- Снижение влияния «человеческого фактора»**
- Радиохроматография изотопов водорода
- Изотопная масс-спектрометрия

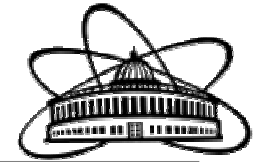
Для создания ПО для АСКУ нужна общая база.

Этой базой стал пакет CRW-DAQ.

Пакет CRW-DAQ: идеи

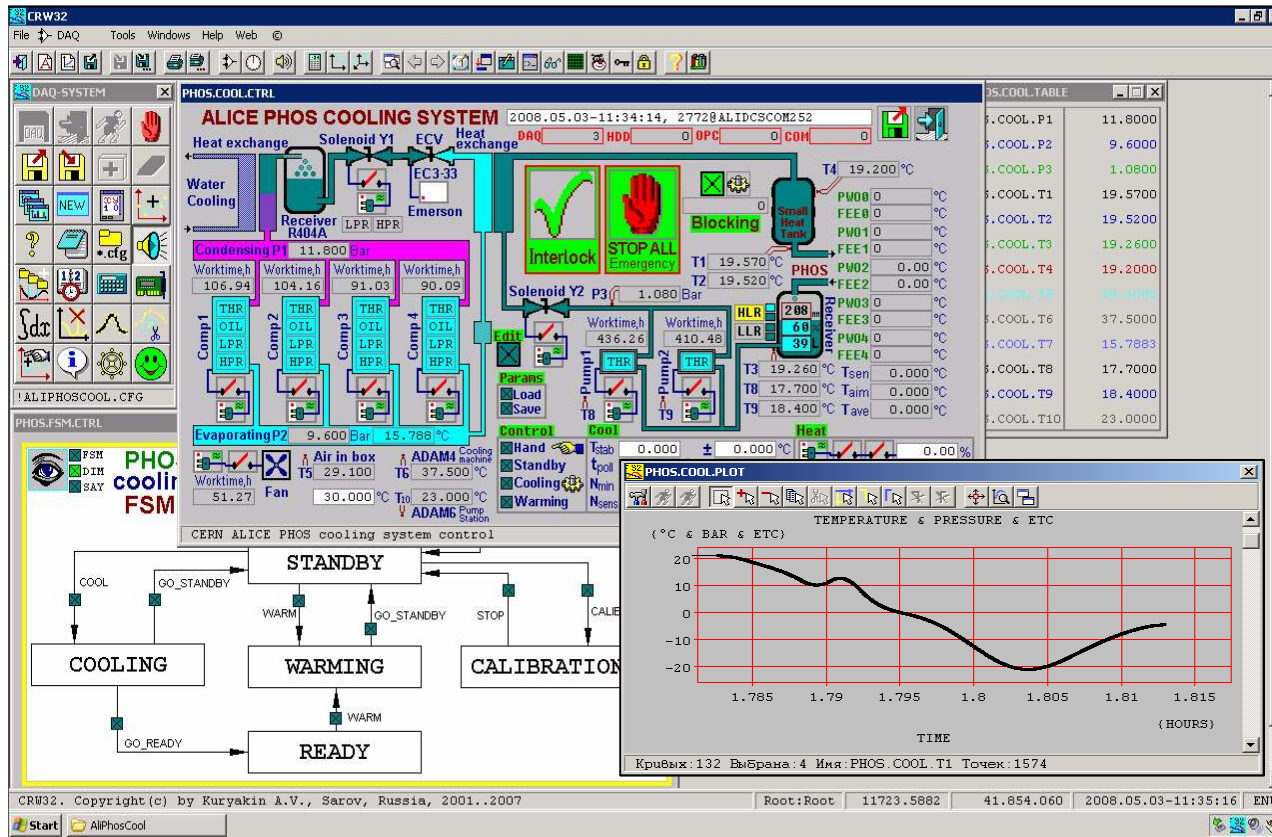


- ❑ **Унификация ПО** тритиевых комплексов (1 пакет, много систем)
- ❑ **Отказоустойчивость** системы управления
- ❑ **Параллелизм** (процессы, потоки, приоритеты)
- ❑ **Поддержка сетевых распределенных систем** управления установками **в реальном времени**
- ❑ **Самодостаточность** – среда должна обеспечить **полный цикл** разработки и поддержки ПО
- ❑ **Адаптивность**, возможность изменять алгоритмы управления без прерывания работы системы
- ❑ **Online** и **Offline** обработка - средства **калибровки** каналов, **сглаживания**, **сжатия** данных и т.д.
- ❑ **(Само-)диагностика** - контроль ресурсов и частот опроса потоков, журналирование, симуляторы и т.д.
- ❑ **Учет специфики** предметной области - создание библиотеки утилит и драйверов для серийного и специального оборудования тритиевых комплексов



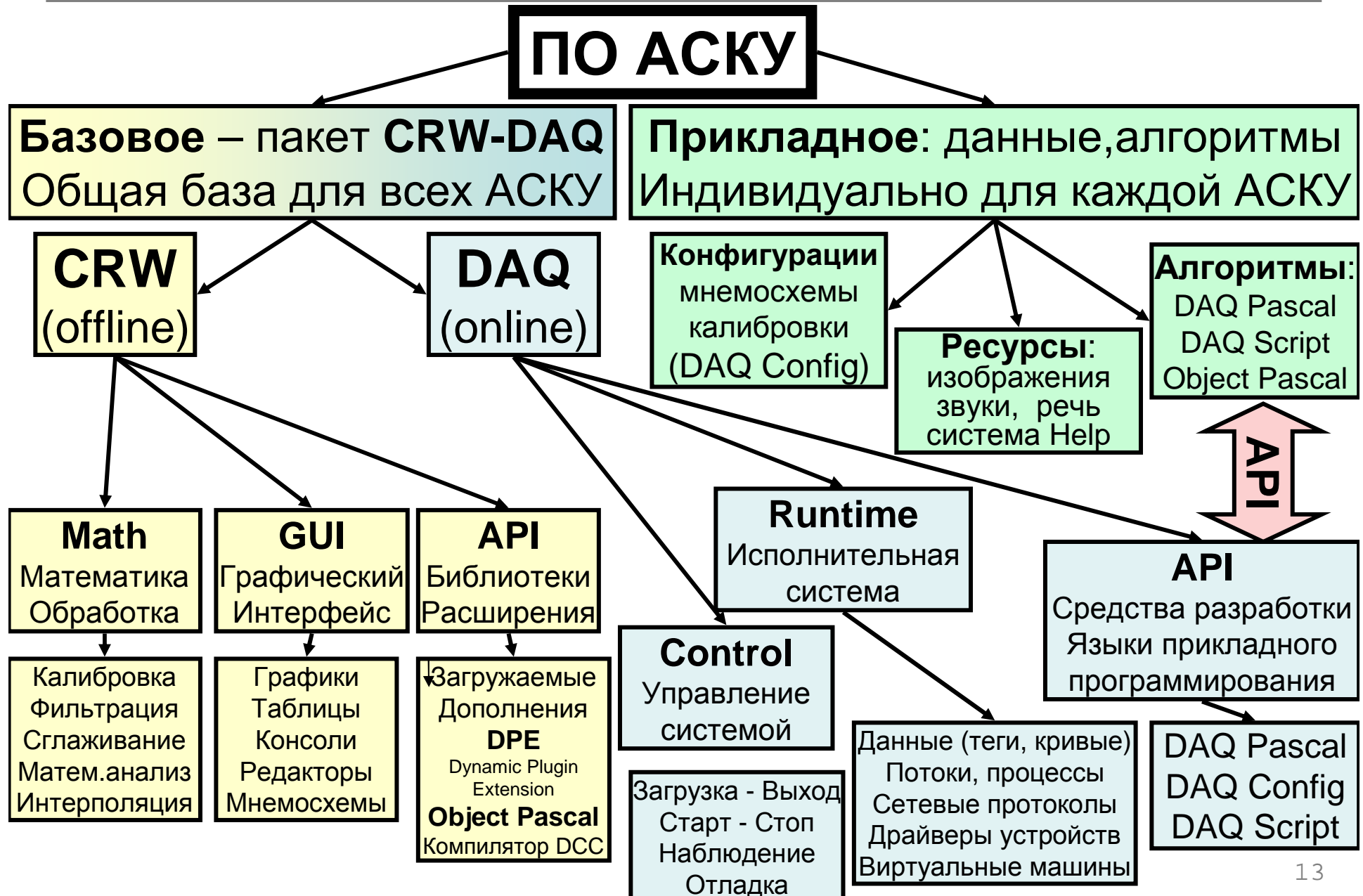
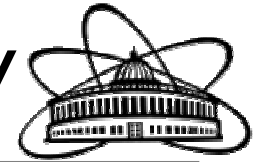
- Зарегистрирован в государственном реестре РФ
- Содержит ~140 тыс. строк кода на Object Pascal
- Развивается с ~ 1998 г.

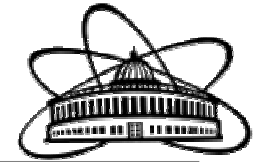
www.crw-daq.ru



Пример графического интерфейса АСКУ, разработанной в среде пакета CRW-DAQ: система охлаждения детектора PHOS, CERN

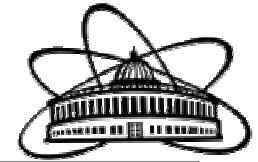






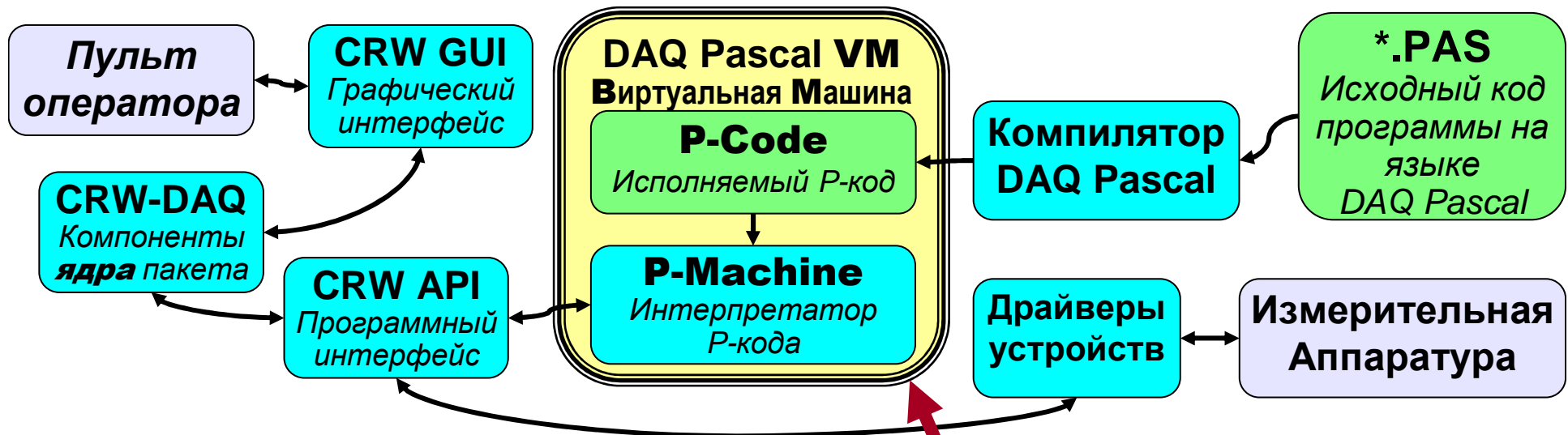
Полный цикл разработки и поддержки ПО АСКУ Разнообразии взаимно-дополняющих средств





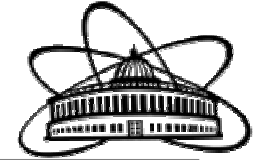
Виртуальные Машины (**DAQ Pascal**) :

- ❑ Облегчают **прикладное** программирование
- ❑ Исполняют **прикладные** программы АСКУ
- ❑ Обеспечивают **параллелизм** (**ВМ = поток**)
- ❑ Обеспечивают **адаптивность** (компиляция «**на лету**»)
- ❑ Повышают **отказоустойчивость** прикладного ПО
- ❑ Позволяют жестко **контролировать ресурсы**



- Системное ПО
- Прикладное ПО

Интерпретатор ВМ защищает ядро от ошибок в коде прикладного ПО



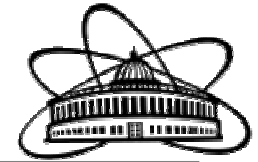
32 КОНСОЛЬ МОНИТОРА РЕСУРСОВ

Output

Process/Thread	Total	Kernel	User	Poll/s
Process summary	3.13	3.13	0.00	*
Main thread	3.13	3.13	0.00	*
All Other Threads	0.00	0.00	0.00	*
Timer activity				*
System.Uart				254.00
Daq.Adams				254.00
System.Debug				17.00
System.Sound				19.00
Daq.Pollin				10.00
Daq.Dispat				254.00
Daq.&DIMSR				363.00
Daq.&WEBSR				85.00
Daq.&DATSR				1.00
Daq.&SPEAK				10.00
Daq.&EBC57				10.00
Daq.&PHOS.				85.00

Для CRW-DAQ характерно:

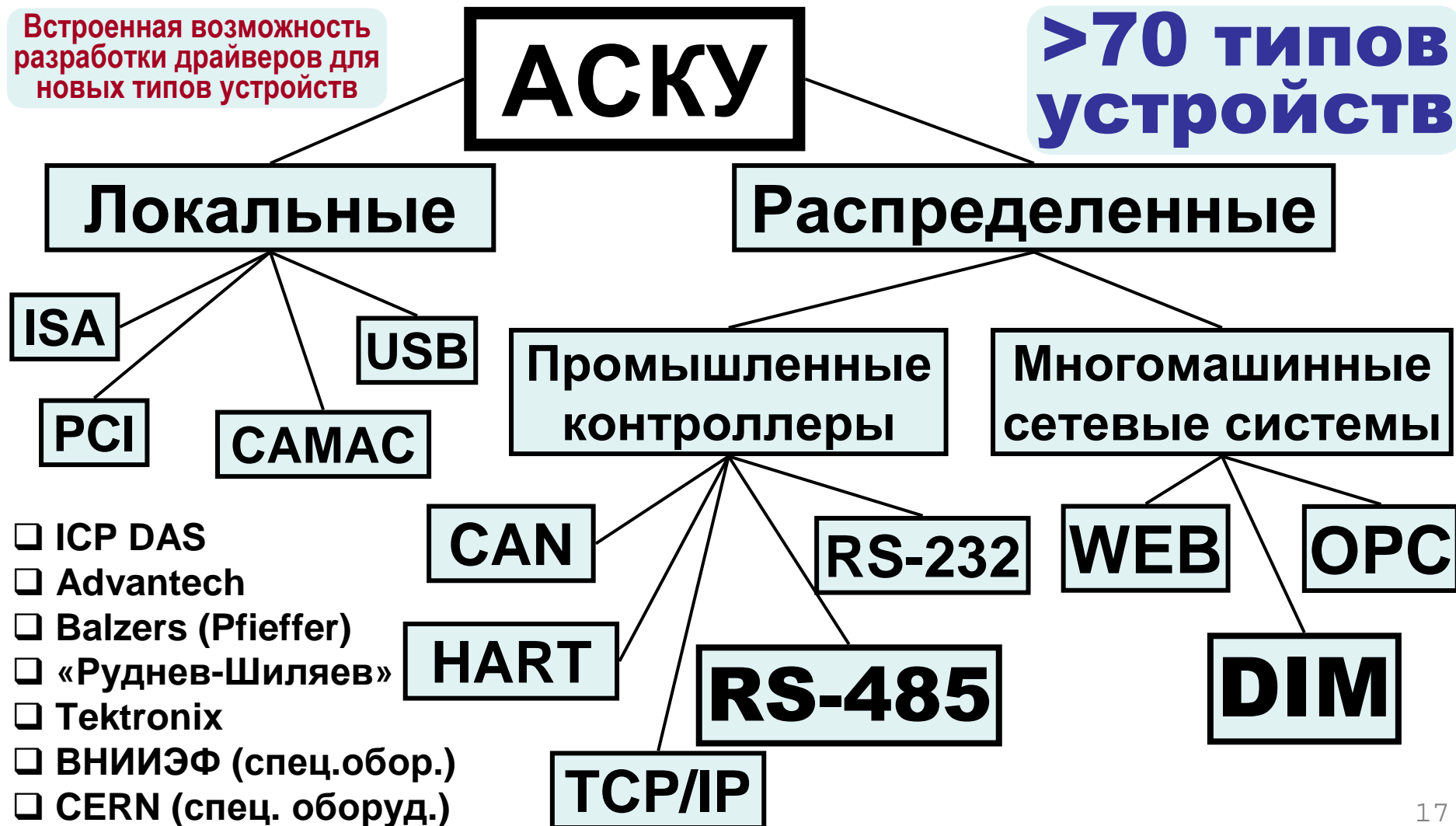
- Много потоков и процессов
- Разделение по приоритетам
- Контроль частоты опроса
- Диагностика «повисания»
- Сторожевой таймер Watchdog
- Асинхронный режим работы
- Обмен сообщениями
- Защита потоков (с помощью VM)

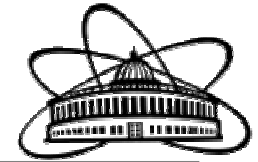


Созданы библиотеки и драйверы для работы с разнообразной аппаратурой в локальных и распределенных системах управления

Встроенная возможность разработки драйверов для новых типов устройств

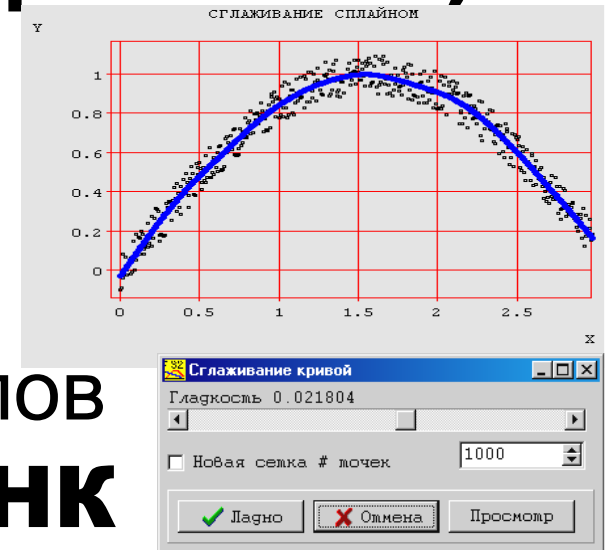
>70 типов устройств



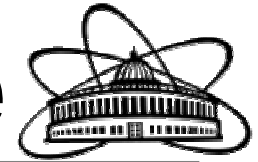


Созданы средства online и offline обработки экспериментальных данных (автоматически и интерактивно)

- Цифровые **фильтры**
- Сглаживающие **сплайны**
- Кодирование-декодирование
- Система **калибровки** каналов
- Аппроксимация данных по **МНК**
- Непараметрическое **сглаживание**
- Online **сортировка** и **сжатие** данных
- Частотный анализ, **Фурье**-преобразование
- Возможность **создания** и подключения **DLL**

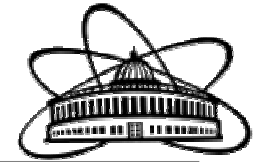


CRW-DAQ: сравнение



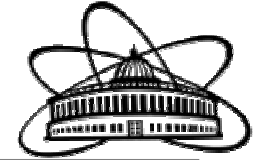
У всех пакетов есть **плюсы** и **минусы**. Что нужно именно **ВАМ**?

Свойство	CRW-DAQ	LabView, WinCC и другие
Ориентация	исследования	промышленность
Поддержка	на уровне лаборатории с 1998	фирменная
Документация	есть, достаточная	есть, обширная
Книги, журналы	нет	есть
Примеры, шаблоны	есть, много	есть, немного
Исходный код, открытость	открытый, принцип «ЗНАЮ КАК»	закрытый, «ЧЕРНЫЙ ЯЩИК»
Зависимость от конкретной фирмы	никакой	полная
Лицензионные ограничения	нет	есть, зависит от продукта
Среда разработки	текстовая	визуальная
Синхронизация версий ПО	есть (windiff)	нет (двоичные коды)
Система калибровки	есть, развитая	готовой нет
Самодиагностика, статистика сбоев	есть, развитая	готовой нет
Многопоточность	есть, всегда	потенциально
Компиляция «на лету»	есть, не прерывая измерений	нет, требуется перезагрузка
Отказоустойчивость	есть, виртуальная машина	потенциально
Драйверы серийных устройств	есть, достаточно	есть, очень много
Драйверы нужных спец.устройств	есть, легко добавить новые	нет, но можно добавить
Разработка драйверов спец.устр.	есть, встроенная	есть, требует доп.инструментов



- ЛЯП ОИЯИ - ТРИТОН**, с 1999
- ЛЯР ОИЯИ - АКУЛИНА**, с 2001
- ВНИИЭФ - ПРОМЕТЕЙ**, с 2001
- ВНИИЭФ, > 20 установок**
- НИИФ СПбГУ, СПбГУТ, МГУ**
- CERN (ALICE, PHOS)**

...переходим к описанию установок...



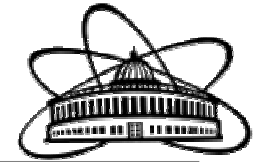
МСФ:



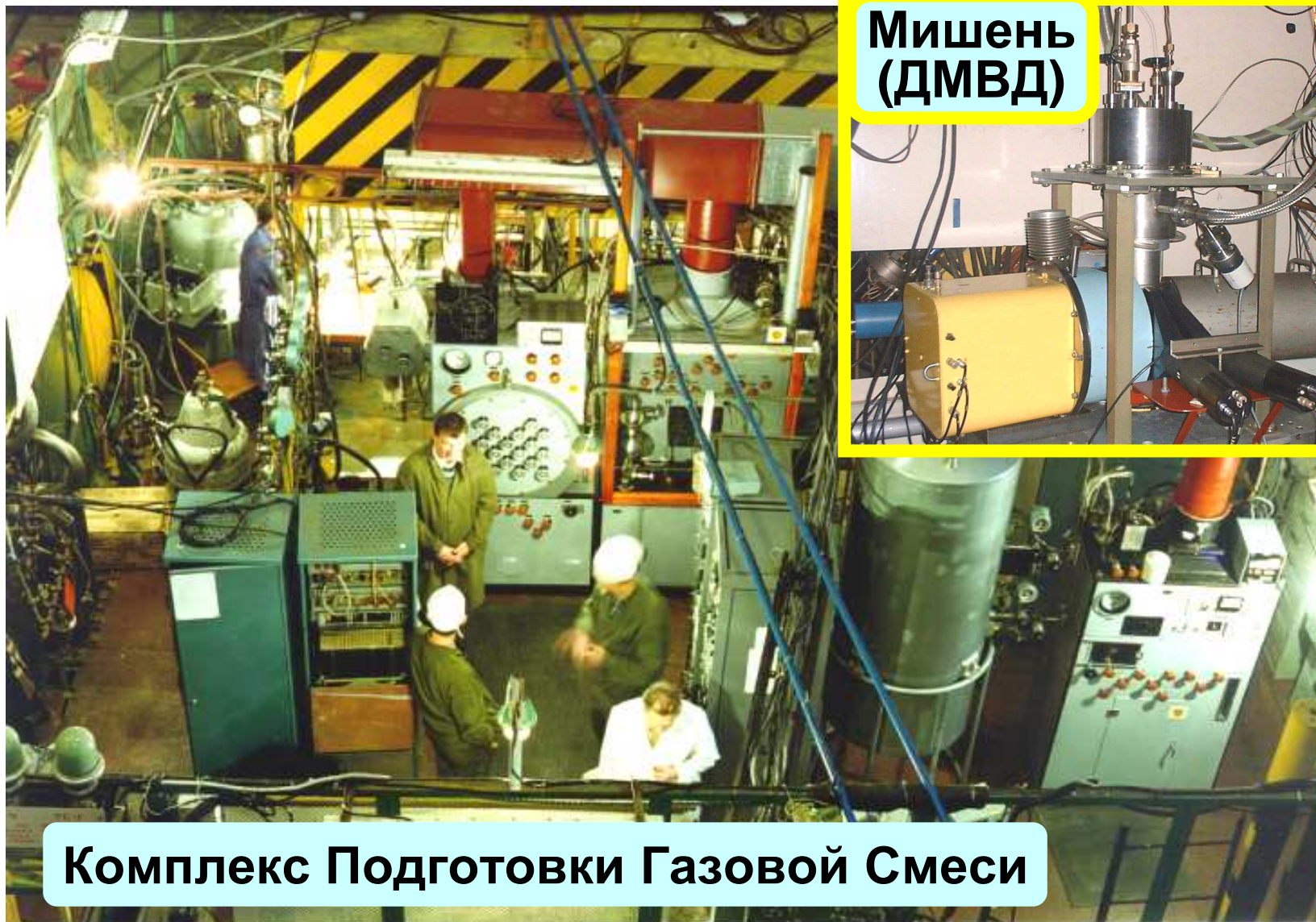
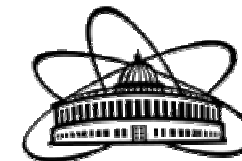
- Мюон – катализатор: инициирует, но не участвует
- Процесс **МСФ** определяется «химией» мезомолекул

Особенность МСФ: зависит от $\{T, \varphi, c_t\}$ -
температуры, плотности, состава смеси ИВ

Задача «ТРИТОН»: изучить зависимость **МСФ**
от $\{T, \varphi, c_t\}$ в широком диапазоне параметров



Работа такого тритиевого мишенного комплекса невозможна без АСКУ

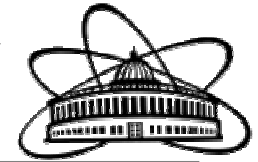


Мишень
(ДМВД)

Комплекс Подготовки Газовой Смеси

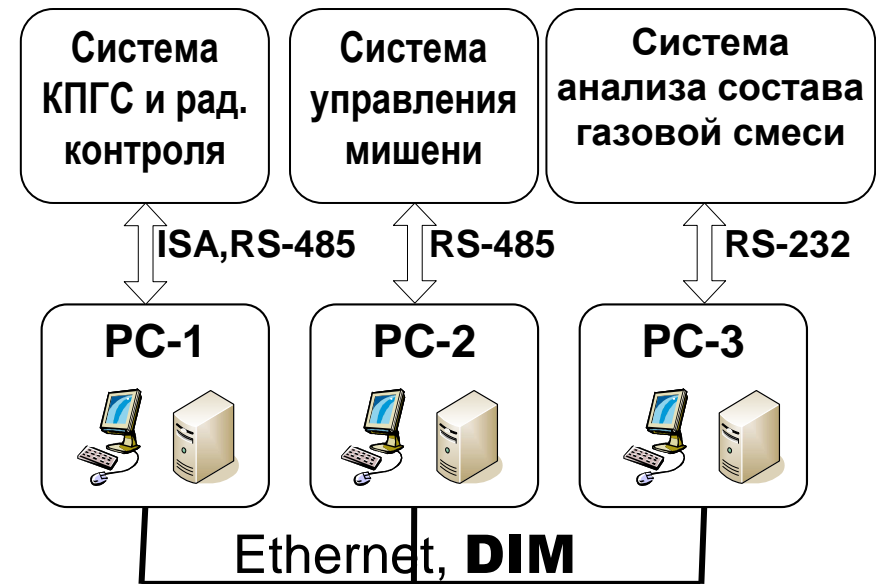
Работа в условиях неспециализированной лаборатории

ТРИТОН: создана АСКУ



АСКУ обеспечивает:

- Управление термодесорбционными источниками трития
- Утилизацию трития на ловушки
- Подготовку газовой H/D/T смеси
- Анализ состава H/D/T смеси
- Подачу H/D/T смеси в мишень
- Измерение и стабилизацию T мишени в диапазоне 20÷1000 К
- Контроль P мишени до 2500 бар
- Радиационный контроль по тритию
- Аварийную сигнализацию
- Аварийные блокировки
- Полный протокол измерений и управления

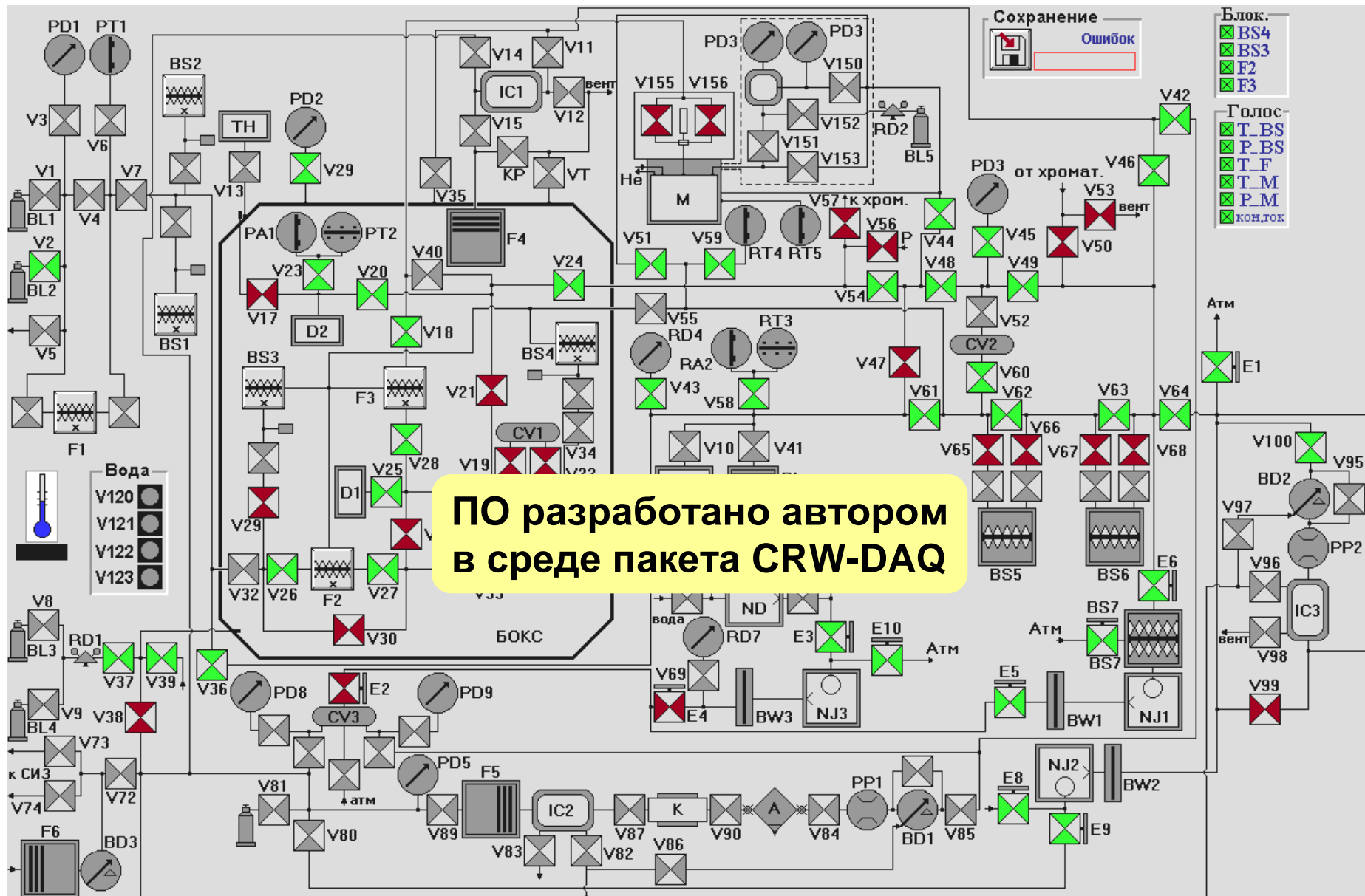
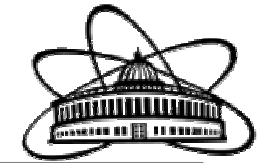


Общая структура АСКУ.

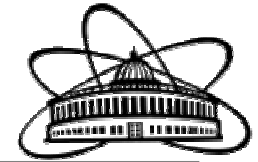
АСКУ включает:

Серверов - 3
Каналов измер. - 110
Каналов управл. - 30
Точек рад. контр.- 4

ТРИТОН: мнемосхема КПГС и СРК



- Сохранение**
Ошибок
- Блок:**
 BS4
 BS3
 F2
 F3
- Голос:**
 T_BS
 P_BS
 T_F
 T_M
 P_M
 КОН,ТОК



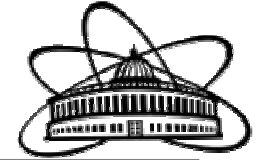
Тритий (до 100 кКи) хранится в металлгидридных термодесорбционных источниках

Для получения и утилизации **ИВ** создана многоканальная система управления нагревателями источников, ловушек и фильтров:

- ❑ мощность 1÷2 кВт, температура до ~1000 К с точностью ± 1 К;
- ❑ программный режим **ШИМ**, высокий КПД, низкая стоимость;
- ❑ обеспечена **система блокировок** по температуре, давлению и объемной активности трития в газопроводах и воздухе;
- ❑ обеспечена **отказоустойчивость** системы управления.



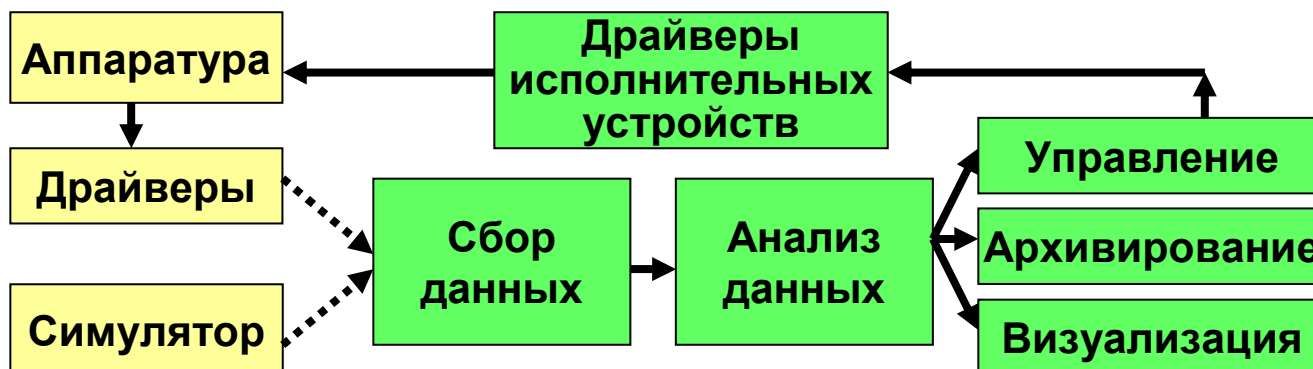
Отказоустойчивость



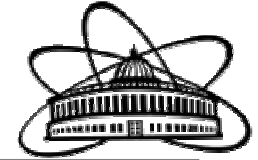
Обеспечена структурой АСКУ и рядом мер:

- Дублирование (основное + резервное управление);
- Самодиагностика (раннее обнаружение сбоев);
- Автономность подсистем (за счет параллелизма);
- Изоляция подсистем (локализация влияния сбоев);
- Техника безопасного программирования (SEN, OOP, ...);
- Иерархия управления (распределение функций);
- Система симуляции (для отладки реакции на сбои)

Симуляция нужна: нельзя «натурно» создать аварийные условия.

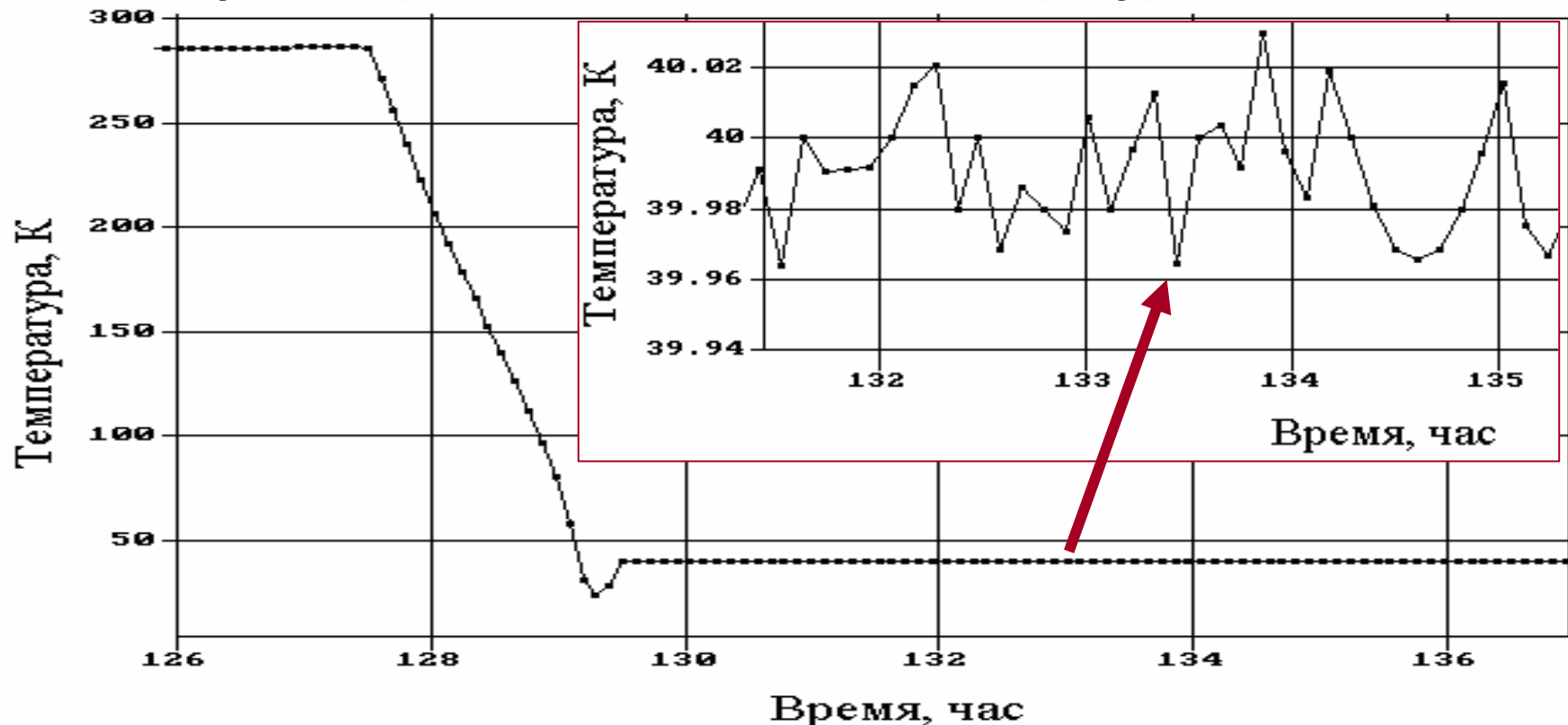


Пакет **CRW-DAQ** имеет развитую систему симуляции для отладки реакции на сбои.

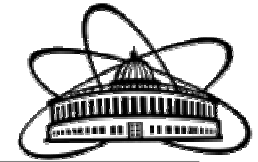


Система контроля и управления мишени обеспечила:

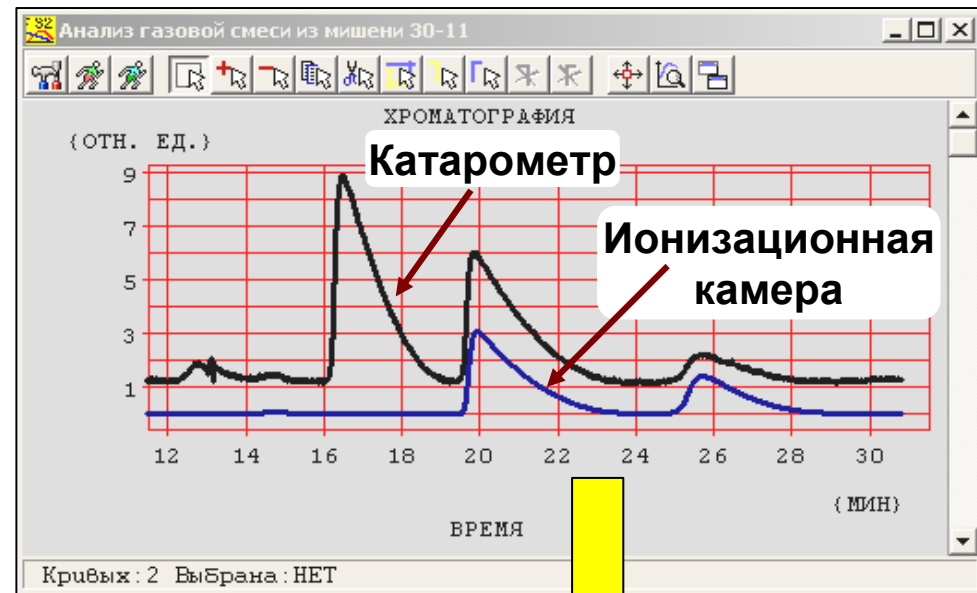
- Измерение давления - в мишенях до **2500 бар**.
- Измерение температуры - в мишенях **20÷1000 К**.
- Стабилизацию темп. ТМВД, ДМВД в диапа. **300÷800 К (± 1 К)**
- Стабилизацию темп. ЖТМ в диапа. **20÷40 К с точностью ± 0.1 К**
- Систему блокировок по давлению, температуре, объем.активности



Пример: стабилизация температуры ЖТМ с точностью ±0,1 К



На базе радиохроматографа (катарометр + ИК) создана система для определения изотопного и молекулярного состава газовой H/D/T смеси. В пакете **CRW-DAQ** автором разработана программа сбора данных и расчета состава смеси по данным катарометра и ионизационной камеры. На рисунках – пример расчета.



HDT.CTRL

Формулятор для расчета H/D/T смеси

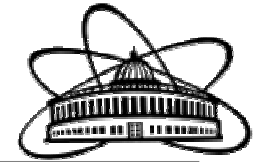
	S хроматограф	S ион.камера	Норм	КОЧ.	Молек. %	Атомн. %
He	<input type="checkbox"/> 0			0.57	0	0
HH	<input type="checkbox"/> 0			1	0	1.275
HD	<input checked="" type="checkbox"/> 0.497502			0.74	1.9471	
HT	<input checked="" type="checkbox"/> 0.1048918	<input checked="" type="checkbox"/> 0.0650267	<input checked="" type="checkbox"/>	0.59	0.6028	
DD	<input checked="" type="checkbox"/> 9.117287			0.59	44.7547	67.1087
DT	<input checked="" type="checkbox"/> 7.234664	<input checked="" type="checkbox"/> 4.612733	<input checked="" type="checkbox"/>	0.49	42.7609	
TT	<input checked="" type="checkbox"/> 1.576051	<input checked="" type="checkbox"/> 2.143306	<input checked="" type="checkbox"/>	0.39	9.9344	31.6163

Расчет Запись в файл Сброс

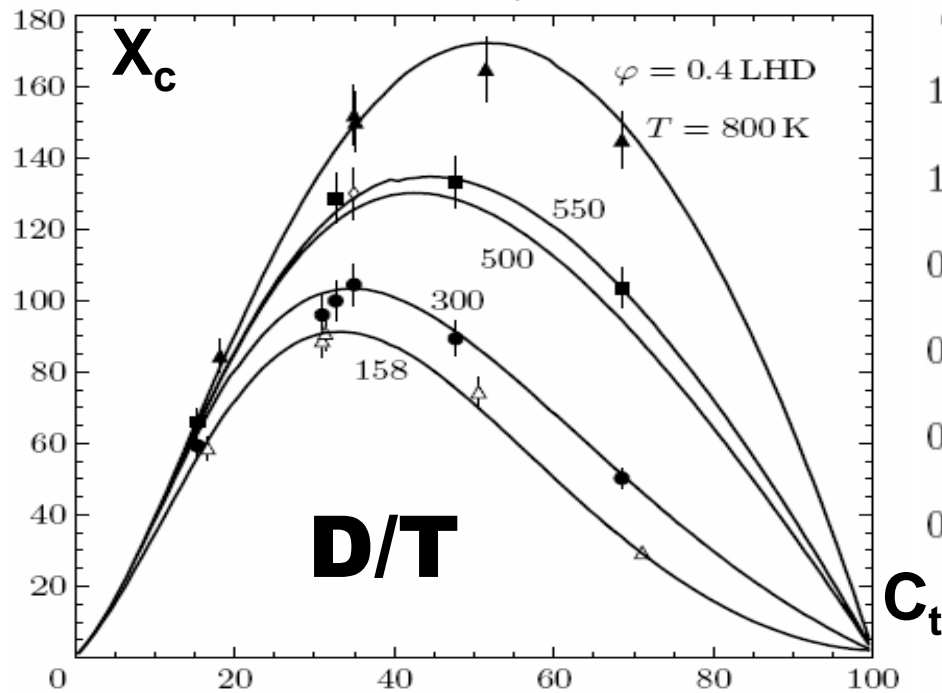
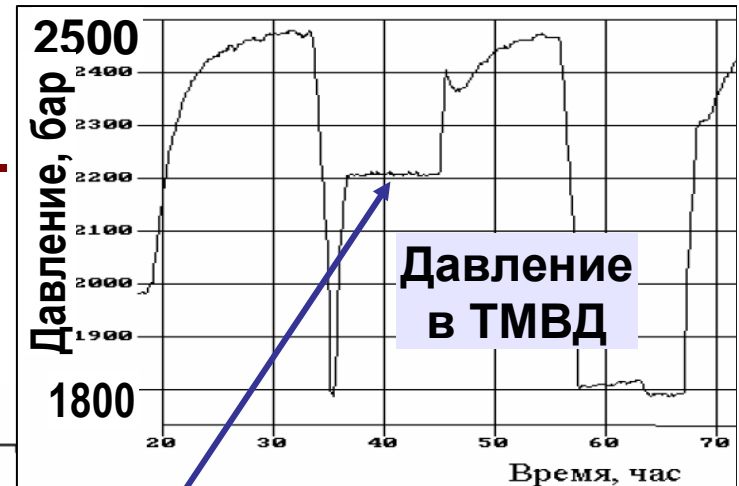
Надо выделить окно/кривую катарометра/ион.камеры. В окне нажать и выбрать пределы пика. Затем нажать He...TT. Интеграл должен попасть в соответствующее поле ввода. Когда площади всех пиков и выбора пика Норм нажать Расчет. Расчет сделан, можно вызывать Запись. Сброс зануляет все.

```

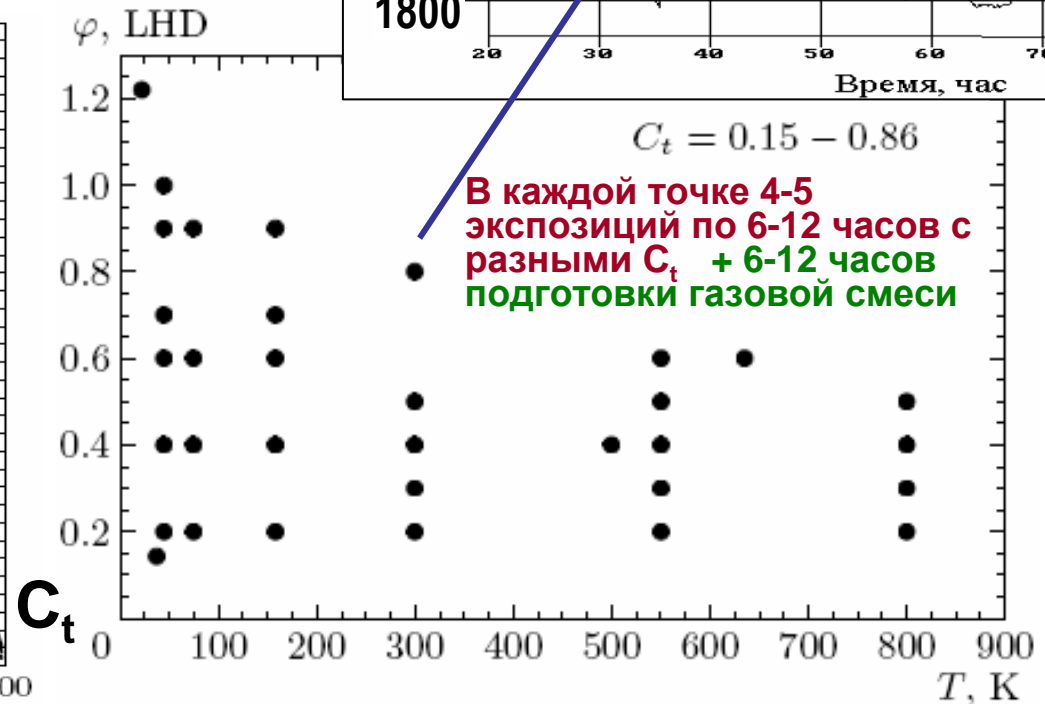
*****
H/D/T composition analysis done 2008.08.21-14:23:12
      S kat      S ion  Molecular,%  Isotope,%  КОЧ
He      0         -      0.0000    0.0000    0.57
H2      0         -      0.0000    1.2750    1.00
HD     0.4975     -      1.9471    -         0.74
HT     0.1049     0.0650  0.6028    -         0.59
D2     9.117      -      44.7547   67.1087   0.59
DT     7.235      4.6127  42.7609    -         0.49
T2     1.576      2.1433  9.9344    31.6163   0.74
Normalization : peak DT
*****
    
```



Автоматизированный комплекс обеспечил проведение серии ~80 MCF экспериментов на D/T, измерение физ. параметров: φ , T, C_t . Впервые MCF был изучен в широкой области параметров: $\varphi \rightarrow [0.2 \div 1.2]$ LHD, $T \rightarrow [20 \div 800]$ K, $C_t \rightarrow [15 \div 86]$ %

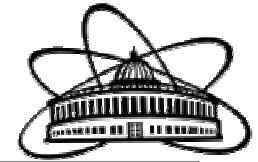


Пример зависимости числа X_c циклов MCF от состава c_t при $\varphi=0.4$ и $T \leq 800$ K.

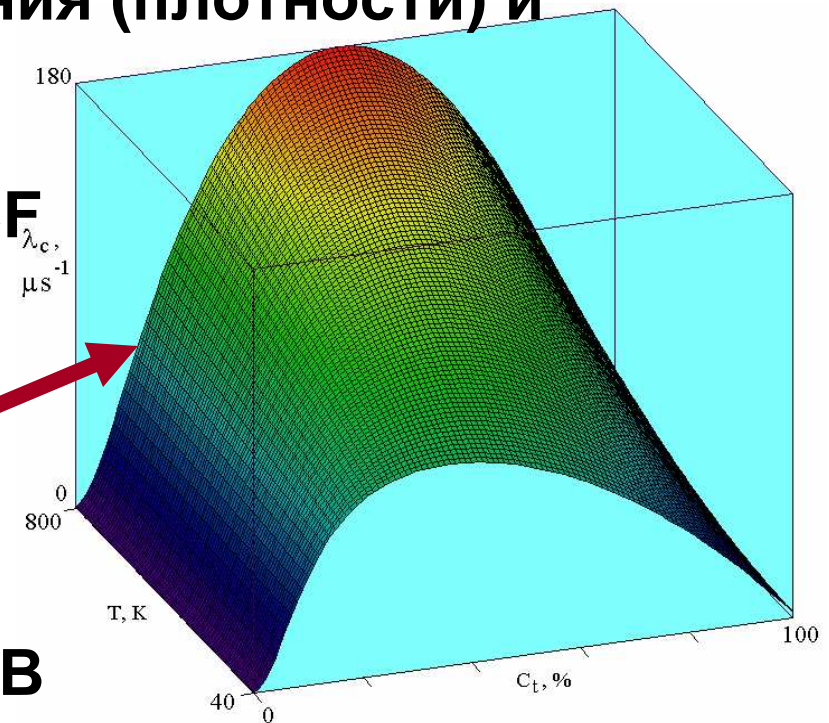


Область параметров φ , T, c_t для MCF экспериментов в смесях ИВ, 1997-2004 гг.

Более 2000 часов в режиме непрерывных измерений

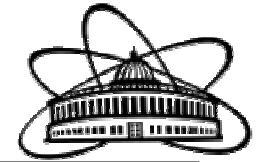


- Автоматизированная система обеспечила **функционирование** мишенного комплекса установки ТРИТОН при проведении цикла систематических исследований мюонного катализа в D/T и H/D/T смесях в широком диапазоне параметров, а также **измерение основных** макроскопических **физических параметров мишени**: температуры, давления (плотности) и изотопного состава смеси.
- Полученные на установке результаты исследований МСФ в D/T смесях имеют важное научное и практическое значение, например, для оптимизации параметров мюонно-каталитического гибридного реактора интенсивного источника 14МэВ нейтронов.

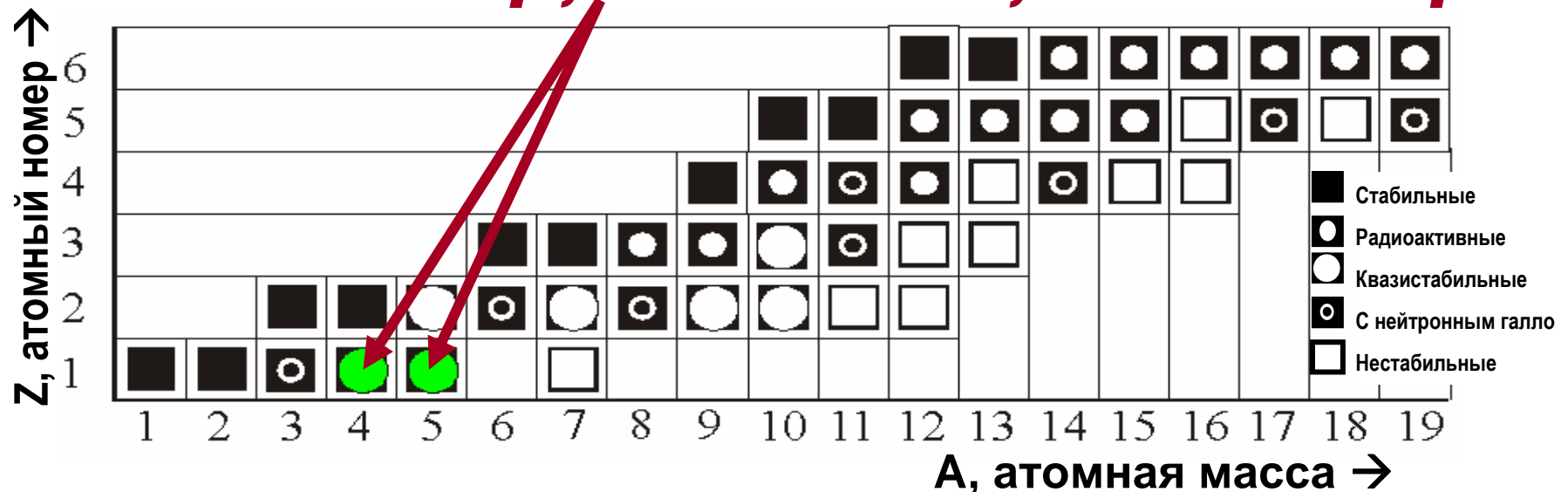


Число циклов МСФ от T, C_t
(по результатам ТРИТОН) 31

АКУЛИНА: задача



Изучение легких нейтронно-избыточных ядер, образующихся при взаимодействии пучка ионов трития с тритиевой мишенью

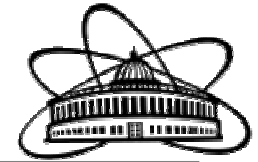


ЛЯР ОИЯИ:

- Циклотрон У-400М
- Сепаратор АКУЛИНА
- Сбор и анализ ЯФ данных

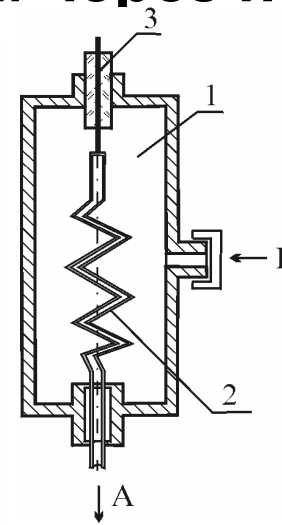
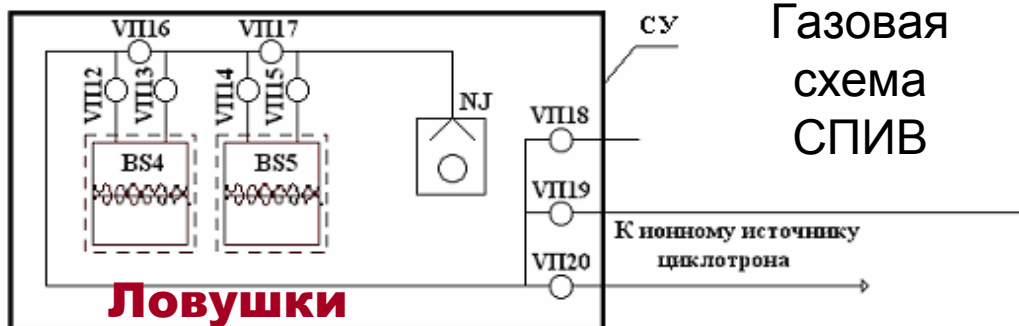
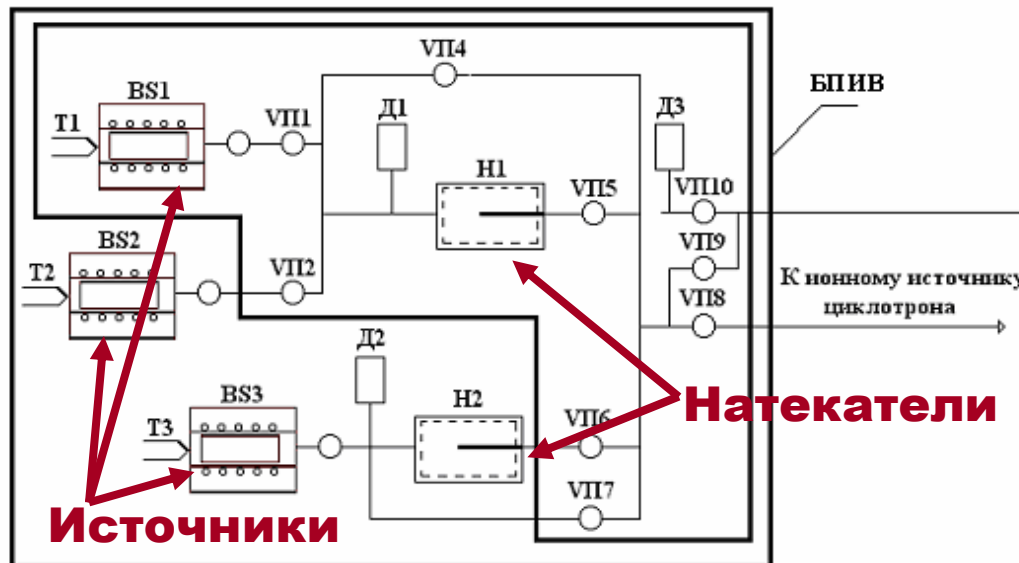
ВНИИЭФ:

- Источник ионов трития для циклотрона
- Жидко-тритиевая мишень и комплекс обеспечения



Задачей системы является регулируемая подача смеси ИВ заданного состава, с заданным потоком ИВ в ионный источник циклотрона У-400М.

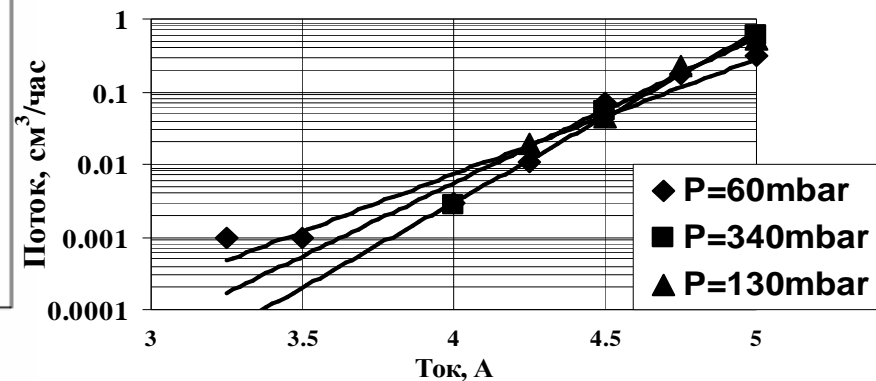
Потоки ИВ регулируются током через натекатели.



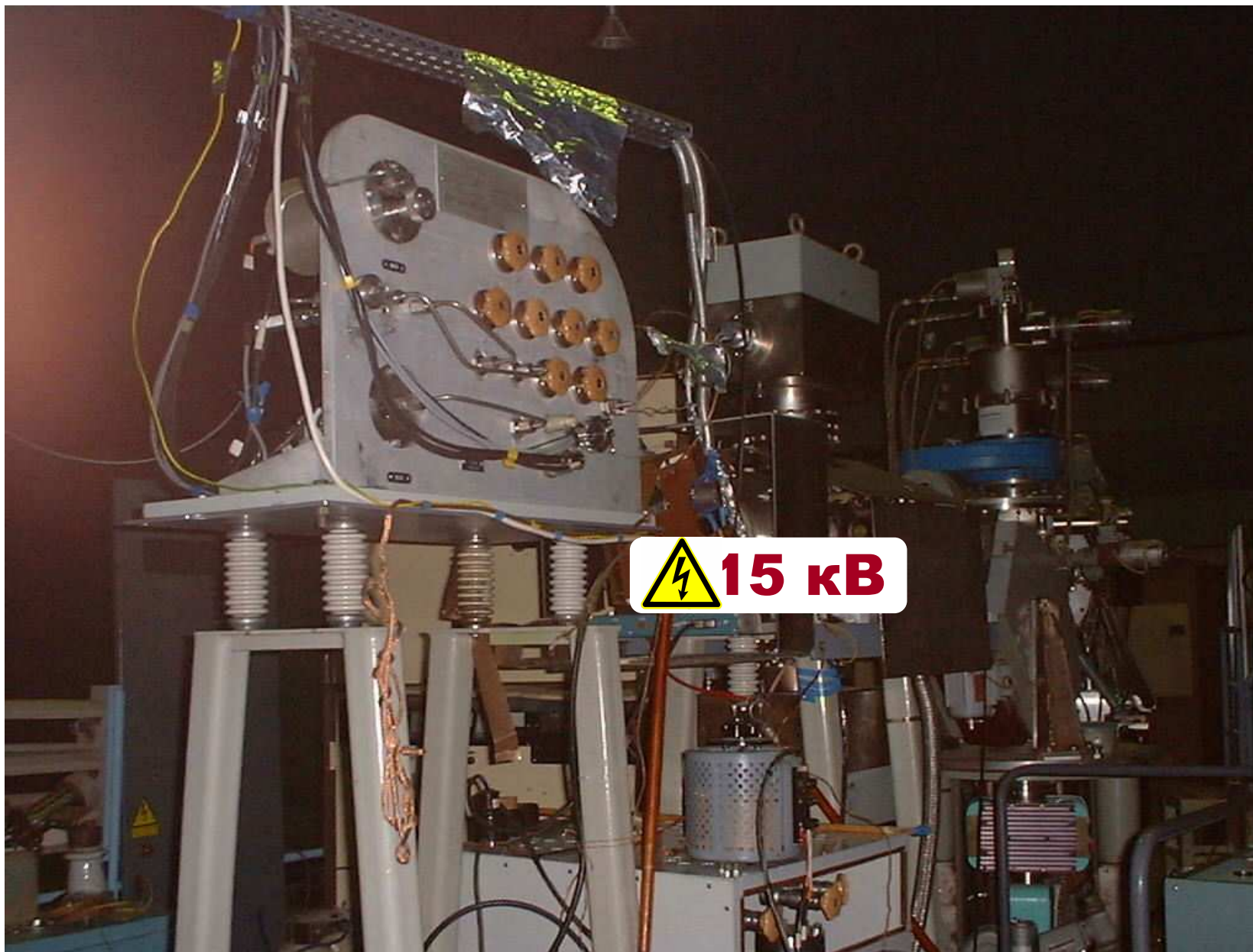
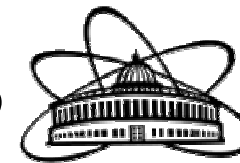
Натекатель

- 1 – корпус натекателя
- 2 – никелевый капилляр
- 3 – электроввод
- А – выходной поток
- В – входной поток

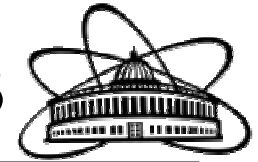
Ni, \varnothing 0,1 мм
 $5 \cdot 10^{-3} \div 5$ см³/час



Зависимость потока ИВ от тока через натекатель




 **15 кВ**



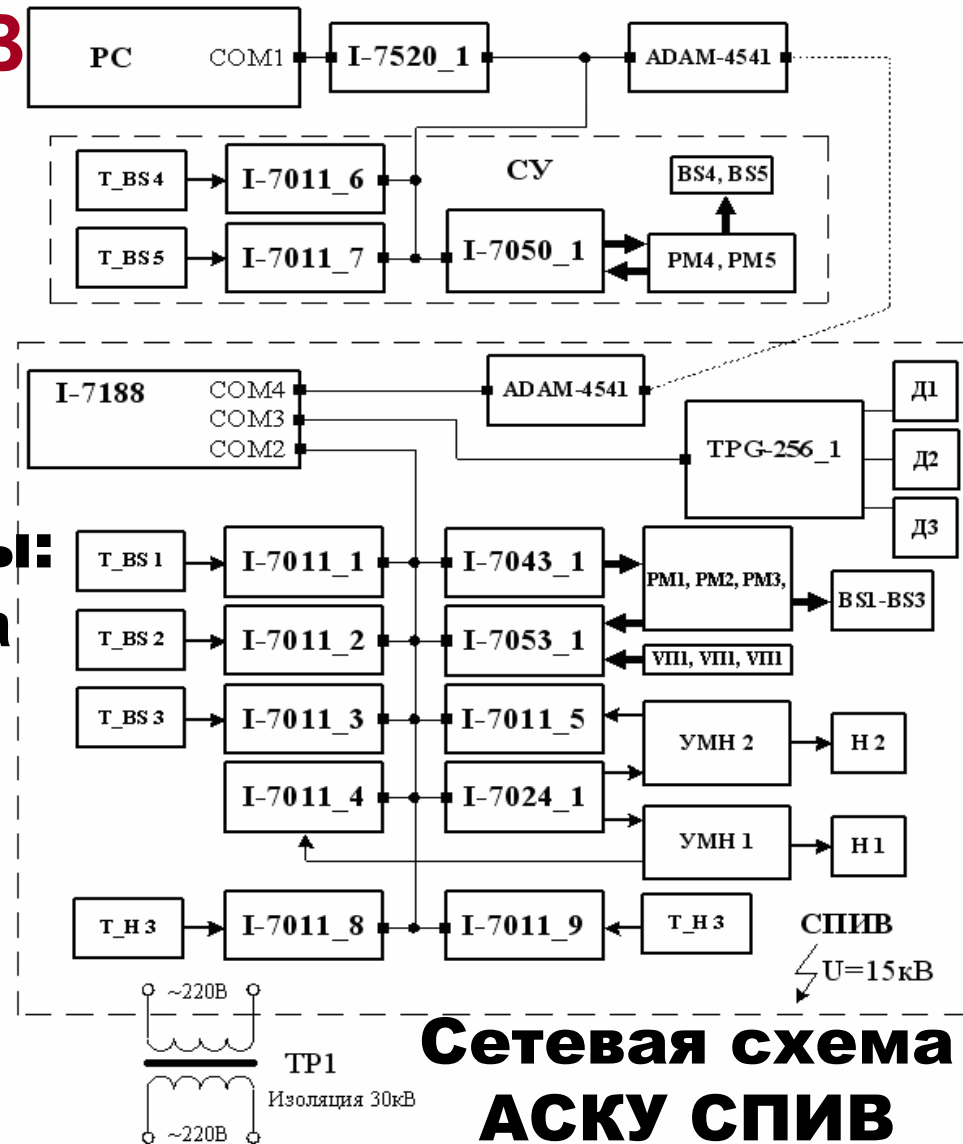
Для управления **СПИВ**
разработана АСКУ:
Каналов измерения - 21
Каналов управления - 8
Удаленное управление

Трудные условия работы:

- сильное ЭМП циклотрона
- потенциал **~15 кВ**
- случаются пробой 

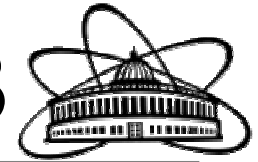
Принятые меры:

- силовая развязка 30 кВ
- оптическая линия связи
- поканальная опторазвязка



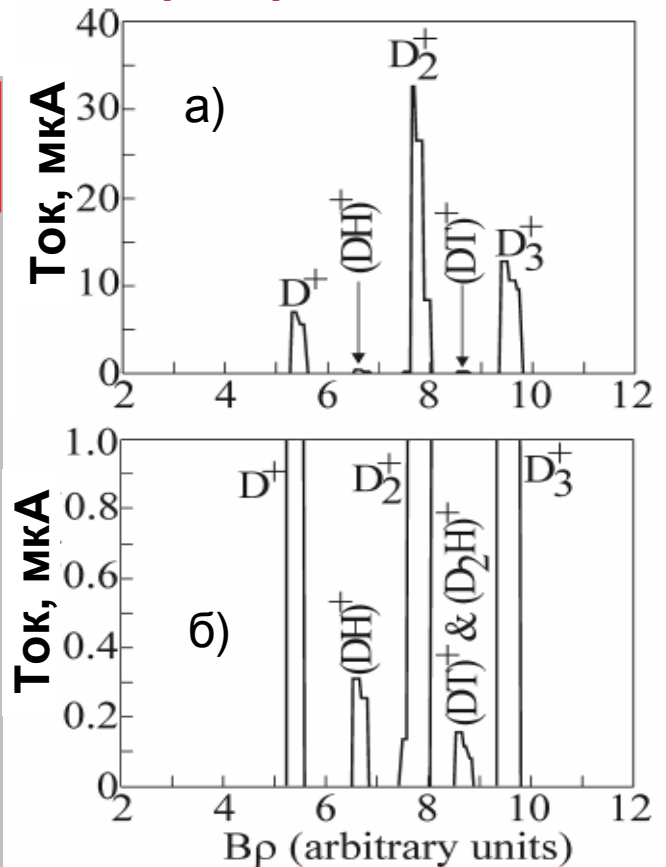
**Сетевая схема
АСКУ СПИВ**

АКУЛИНА: ПО АСКУ СПИВ

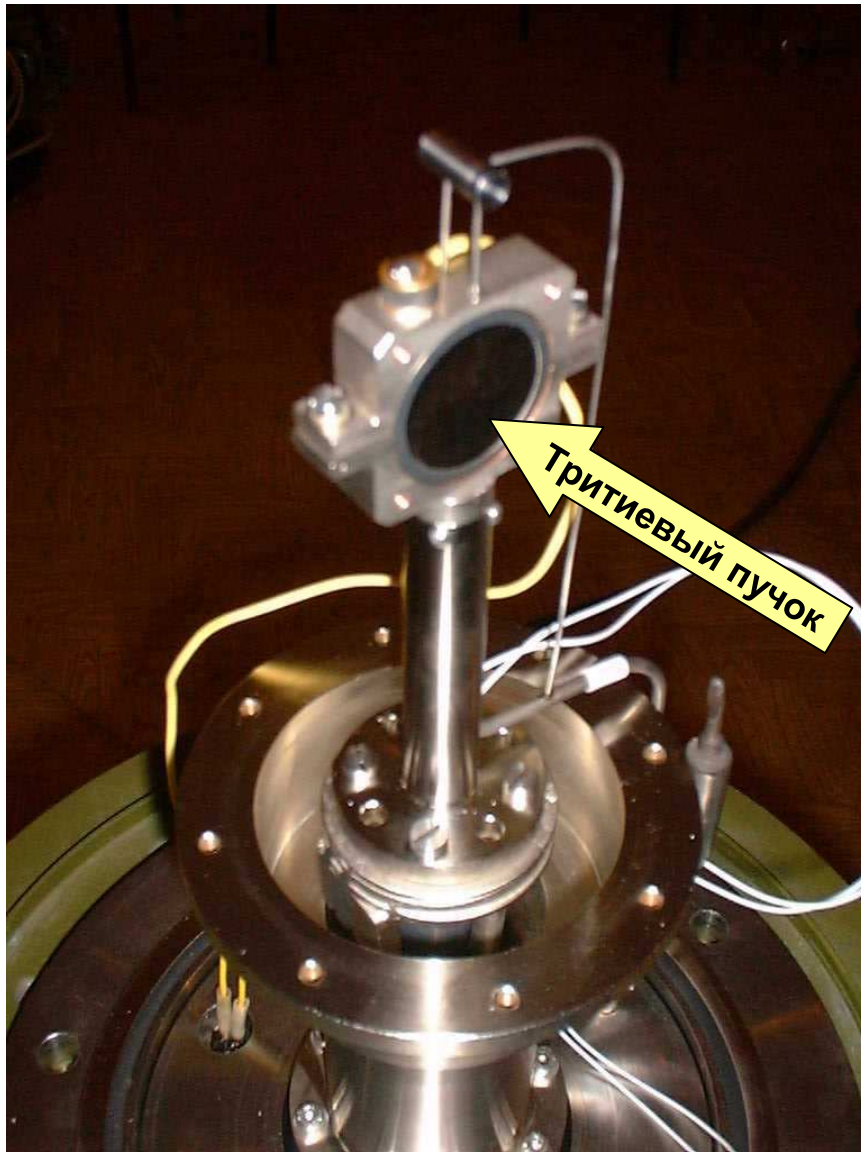
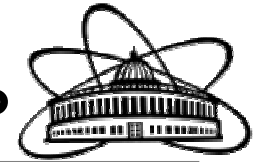


- ❑ Дистанционное управление из пультовой: источниками и ловушками ИВ, током натекателей, контроль температур, давлений, состояния вентиляей
- ❑ Отображение и архивация данных

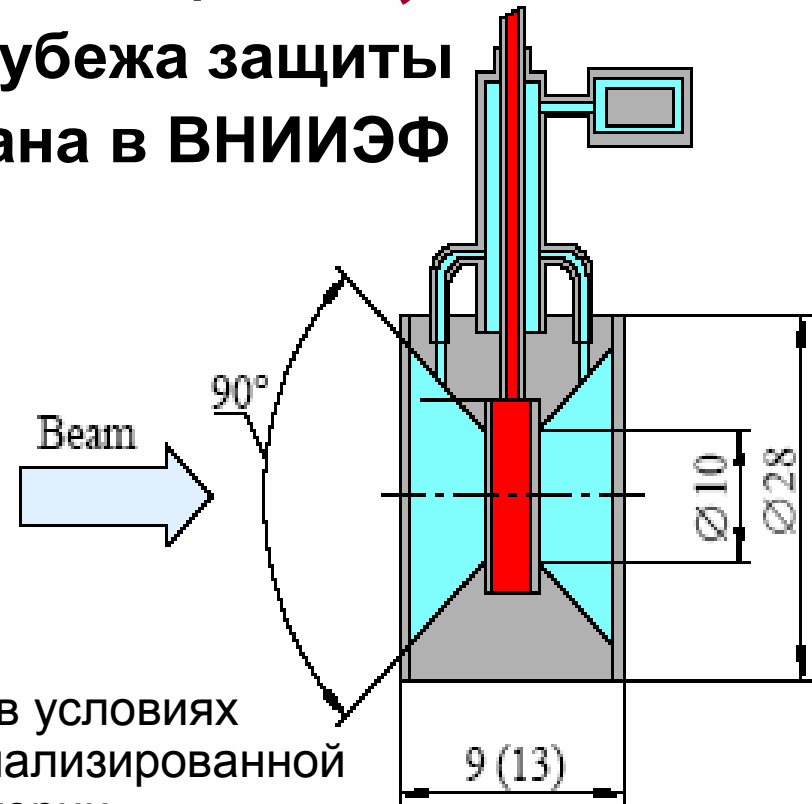
СПИВ позволила:
получить пучок ионов трития (58 МэВ, 10 нА) на сепараторе АКУЛИНА



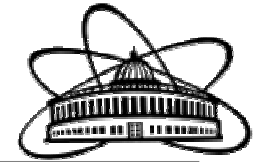
Спектр ионов D/T пучка: полная (а) и увеличенная (б) шкала.



Жидкий тритий, **1 кКи**
Толщина стенок **12,5 мкм**
Рабочая температура **18÷30 К**
Стабилизация **± 0,1 К**
Три рубежа защиты
Создана в ВНИИЭФ



Работа в условиях
неспециализированной
лаборатории

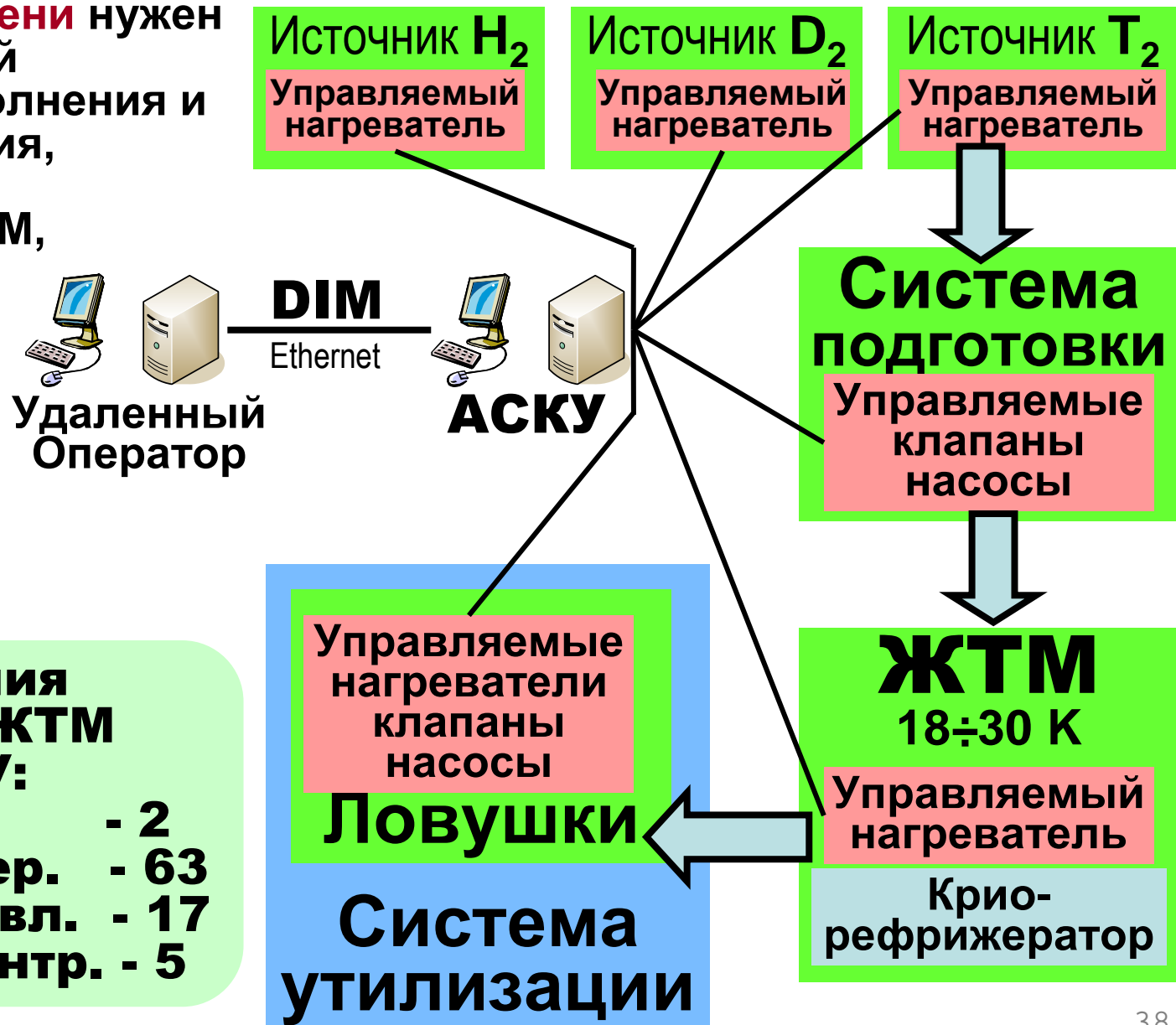


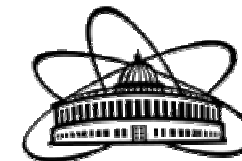
Для работы **мишени** нужен **комплекс** газовой подготовки, наполнения и утилизации трития, стабилизации температуры ЖТМ, рад. контроля

Комплекс не может работать без АСКУ

Для управления комплексом ЖТМ создана АСКУ:

Серверов - 2
Каналов измер. - 63
Каналов управл. - 17
Точек рад. контр. - 5





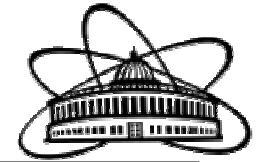
АСКУ

**Газовый
комплекс**

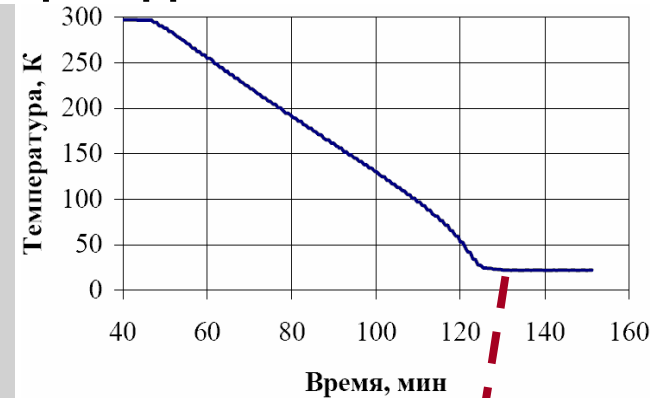
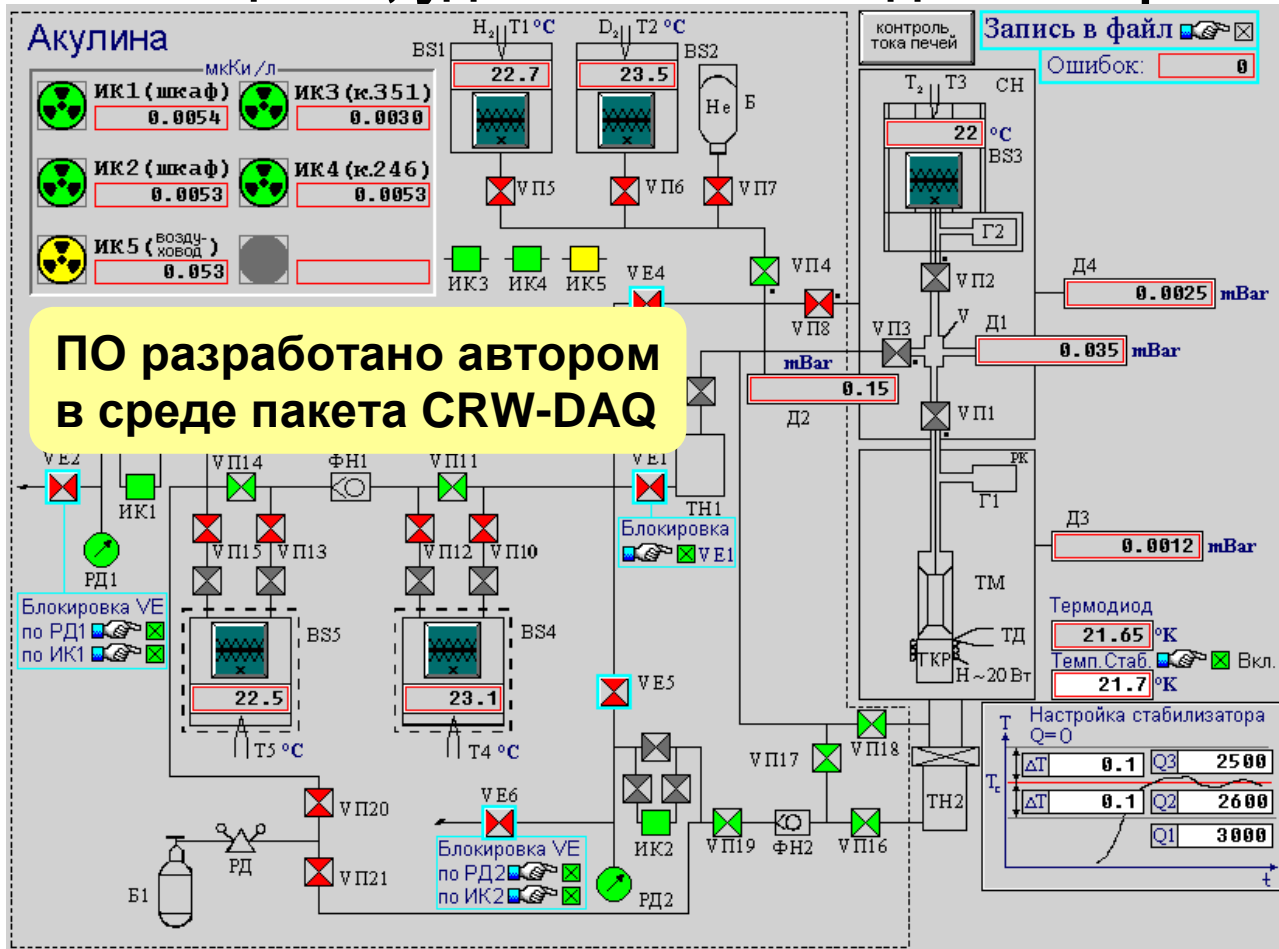
**Мишень
ЖТМ
1 кКи**

**Автоматизированный комплекс обеспечения
ЖидкоТритиевой Мишени на сепараторе АКУЛИНА**

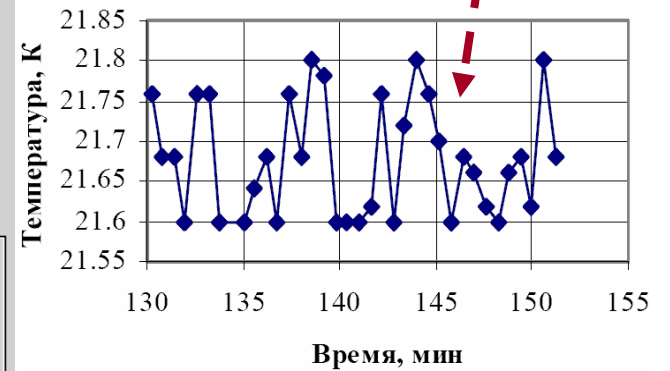
АКУЛИНА: ПО АСКУ мишени



Автоматизированный мишенный комплекс обеспечил подготовку газовой смеси, заправку мишени, измерение и стабилизацию её температуры в диапазоне **15÷300 К** с точностью **± 0,1 К**, утилизацию трития, радиометрический контроль в газовых линиях и помещении, удаленное наблюдение и архивацию данных

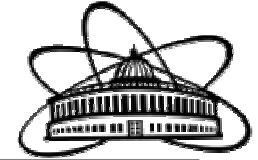


Типичный вид кривой охлаждения



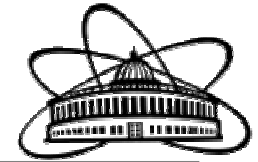
Температура мишени на участке стабилизации, точность ± 0,1К

АКУЛИНА: ВЫВОДЫ



- Создана автоматизированная система управления, обеспечивающая **функционирование** системы подачи изотопов водорода в ионный источник циклотрона У-400М и мишенного комплекса на установке АКУЛИНА.
- С 2001 г. с использованием разработанной АСКУ на радиоактивных пучках ИВ и тритиевой мишени регулярно проводятся исследования нейтронно-избыточных легких ядер.
- С использованием системы подачи ИВ и мишенного комплекса на тритиевой мишени и тритиевом пучке были получены ядра ${}^4\text{H}$, ${}^5\text{H}$, изучены их характеристики, получены и опубликованы новые физические данные по их резонансным уровням.

Установка ПРОМЕТЕЙ



Стенд для исследования взаимодействия изотопов водорода с металлами и КМ

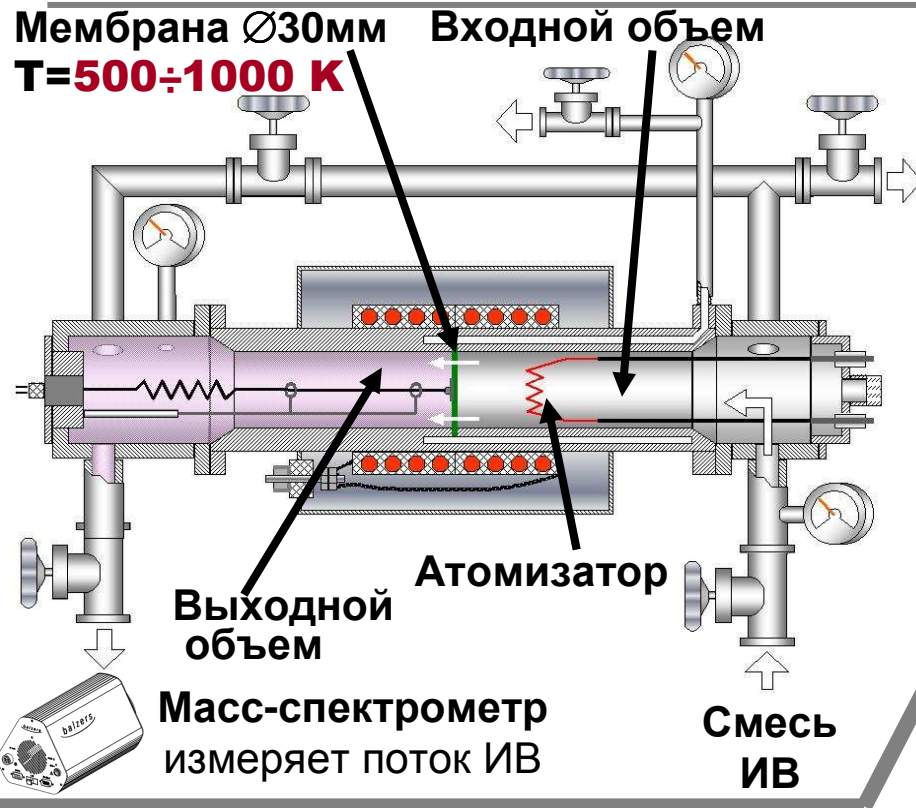
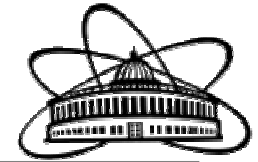


Технологическая часть до **10 кКи**

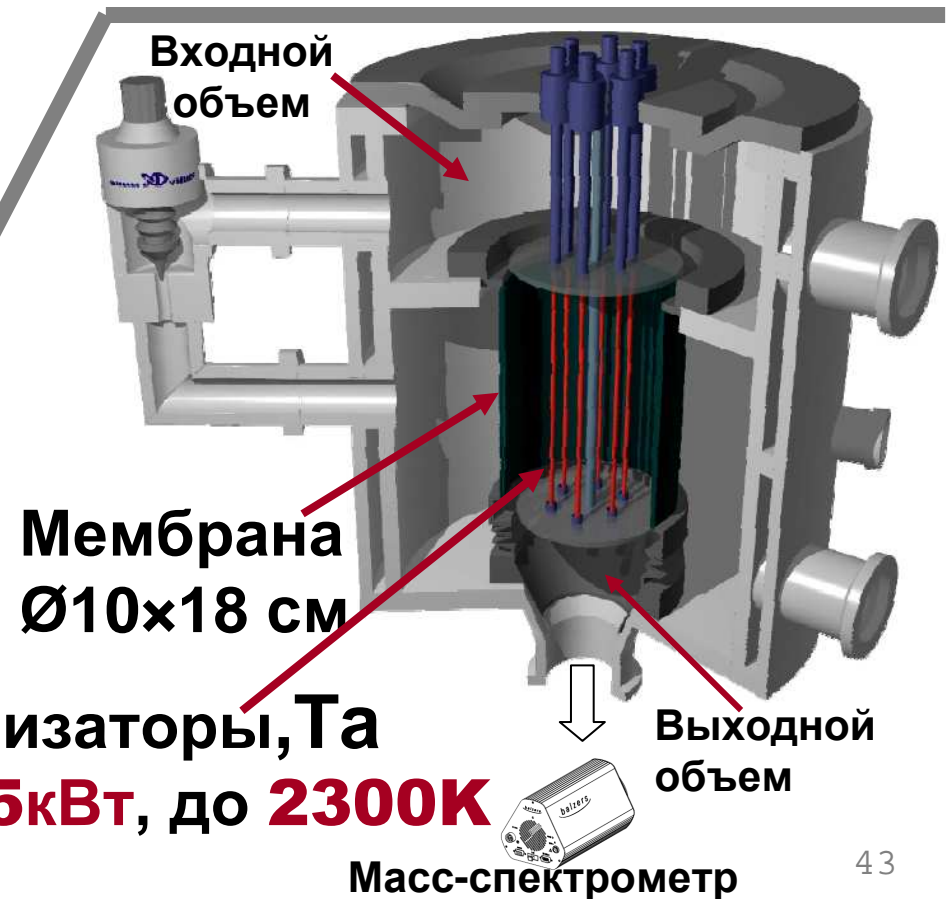
Исследовательская часть до **10 Ки**

Автоматизированная система управления

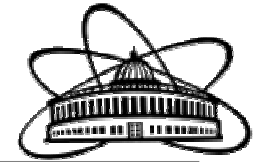
Создан в ВНИИЭФ
с участием НИИФ
СПбГУ, СПбГУТ



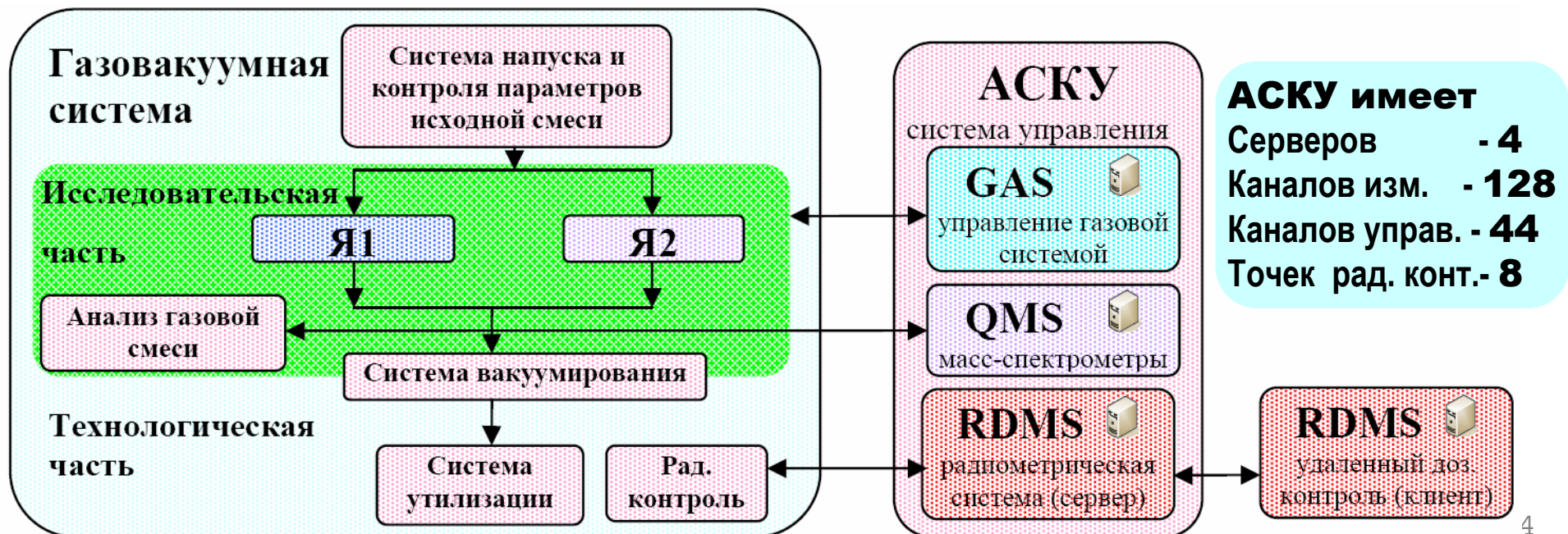
Исследование явлений проникновения и накопления ИВ в металлах и КМ



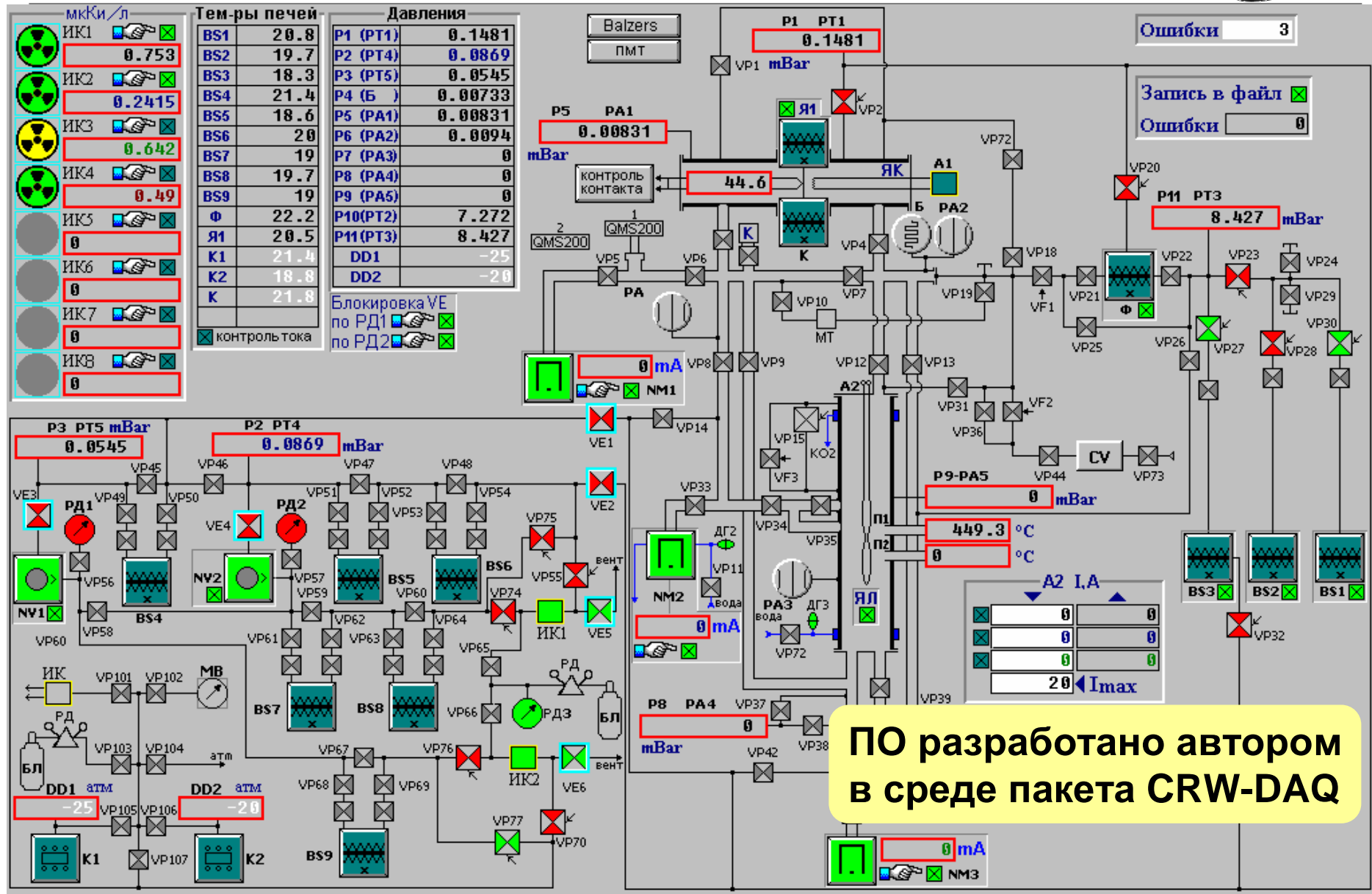
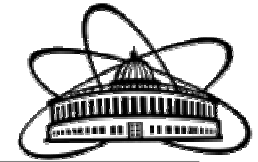
Исследование явления сверхпроницаемости ИВ сквозь цилиндрические металлические мембраны



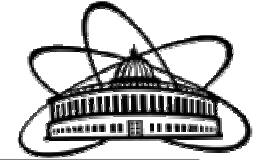
- ❑ Получение ИВ из источников, утилизация ИВ на ловушки
- ❑ Подготовка газовой смеси ИВ, анализ изотопного состава
- ❑ Управление клапанами, насосами, атолизаторами и т.д.
- ❑ Измерение основных физических параметров: давления, температуры, состава смеси ИВ и потока ИВ через мембрану
- ❑ Радиометрический контроль, система сигнализации
- ❑ Система аварийных блокировок
- ❑ Ведение протокола эксперимента, визуализация данных



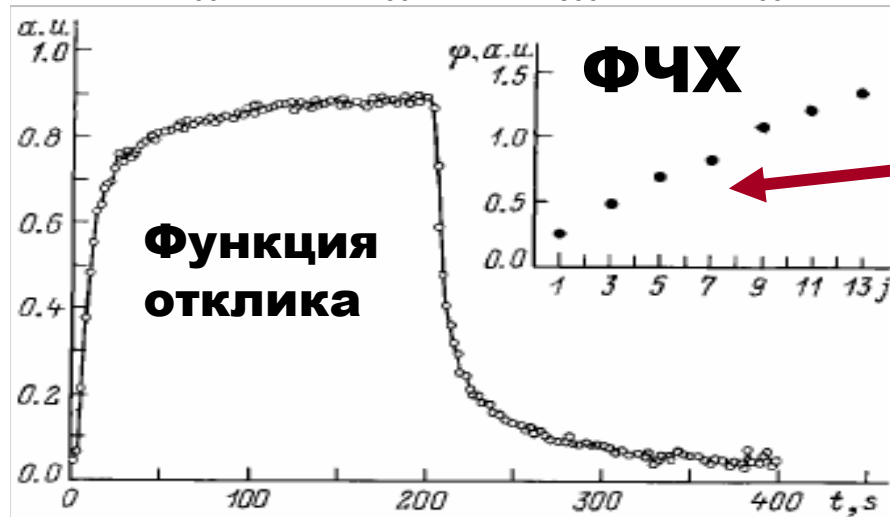
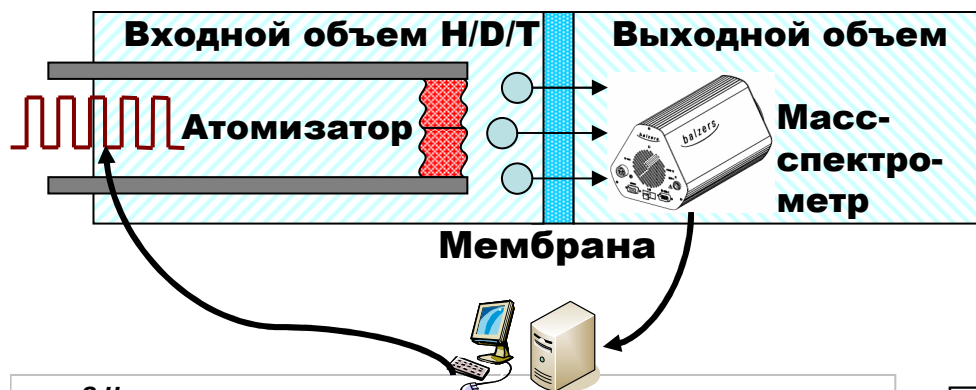
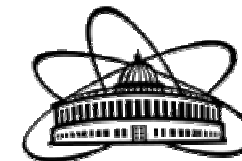
ПРОМЕТЕЙ: ПО для АСКУ



ПРОМЕТЕЙ: что сделано



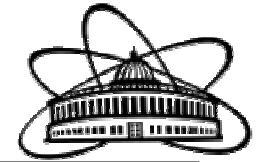
- ❑ Обеспечены **измерения** всех необходимых технологических и **физических параметров**, управление технологическим оборудованием и измерительными ячейками **Я1, Я2**
- ❑ Управление **источниками** (до **10 кКи**) и **ловушками ИВ**
- ❑ Управление мощными (**3x2.5 кВт, 2300 К**) **атомизаторами**
- ❑ Измерение высоких температур с помощью **пирометров**
- ❑ Созданы **алгоритмы** управления газовым комплексом
- ❑ Написаны **драйверы** масс-спектрометров, датчиков вакуума
- ❑ Обеспечено измерение **изотопного состава**, потока **ИВ** через мембраны
- ❑ Создано **ПО** для системы **радиометрического контроля**
- ❑ Реализована **поддержка методики МКИ** на измерительной ячейке **Я1** (метод концентрационных импульсов)
- ❑ Организовано **удаленное наблюдение** через **DIM, WEB**
- ❑ Создана система **блокировок** и аварийной **сигнализации**
- ❑ Обеспечено **протоколирование** результатов измерений
- ❑ Созданы средства для первичного **анализа** данных



Метод Концентрационных Импульсов для изучения процессов взаимодействия водорода с металлами и конструкционными материалами

- ❑ Во входном объеме управляемым атомизатором создаются импульсы концентрации атомарного водорода с периодом ~400 сек
- ❑ В выходном объеме измеряется функция отклика – поток изотопов водорода через мембрану
- ❑ Функция отклика разлагается в ряд Фурье, строится ФЧХ; МНК анализ позволяет извлечь из Фурье-гармоник параметры транспорта водорода через мембрану (коэффициент диффузии и т.д.)
- ❑ Измерительная часть и первичная обработка данных обеспечена ВНИИЭФ
- ❑ Банк моделей для анализа разработан в НИИФ СПбГУ

ПРОМЕТЕЙ: ВЫВОДЫ



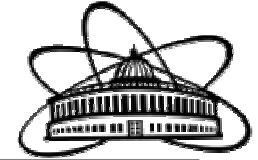
1. Выполнена полная автоматизация физических измерений и управления на стенде ПРОМЕТЕЙ
2. На стенде с 2001 года регулярно проводятся научные исследования

В опытах по изучению сверхпроницаемости ИВ через ниобиевые и ванадиевые мембраны впервые подтверждено явление сверхпроницаемости для трития, измерена скорость мембранной откачки и оценена предельная степень компрессии мембранного насоса на мембранах из Nb и V.



Полученные на автоматизированном стенде ПРОМЕТЕЙ результаты имеют важное научное и практическое значение, например, для обеспечения топливного цикла ТЯР. 48

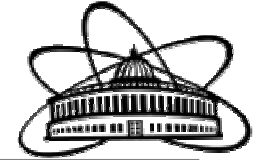
Общий вывод



1. Создана открытая инструментальная программная система для автоматизации исследовательских установок
2. Автоматизированы тритиевые мишенные комплексы ТРИТОН и АКУЛИНА в ОИЯИ
3. Полностью автоматизированы физические измерения на тритиевом комплексе стенда ПРОМЕТЕЙ в ВНИИЭФ

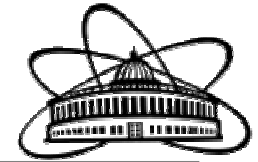
**Спасибо за
внимание**

Список основных публикаций прилагается ниже.
18 статей - в сборнике **ИЗОТОПЫ ВОДОРОДА**.



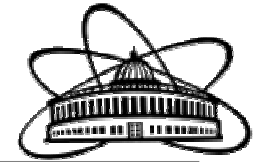
ТРИТОН

1. Ю.И. Виноградов, **А.В. Курякин** и др. Автоматизированная система контроля и управления комплексом подготовки газовой смеси для экспериментального исследования мюонного катализа ядерных реакций синтеза // **ПТЭ**, 2004, № 3. С.29–41.
2. Ю.И. Виноградов, **А.В. Курякин** и др. Автоматизация радиохроматографа РХТ-3 для изотопного и молекулярного анализа водородосодержащих газовых смесей. // **ВАНТ**, серия «Термоядерный синтез», 2008, Вып.2, С.93-97.
3. Ю.И. Виноградов, С.М. Придчин, **А.В. Курякин** и др. Многоканальная автоматизированная система радиационного мониторинга // **Материаловедение**. 2002, № 6. С. 53–55.
4. V.R. Bom, A.M. Demin, **A.V. Kuryakin** et al. Experimental investigation of muon-catalyzed dt fusion in wide ranges of D/T mixture conditions. // **ЖЭТФ**, 2005, Том 127, Вып.4, С.752-779.
5. V.R. Bom, V.V. Filchenkov, **A.V. Kuryakin** et al. Measurement of the temperature dependence of the $dd\mu$ molecule formation rate in dense deuterium at temperatures 85-790 K // **ЖЭТФ**, 2003, Т.123, №. 3, С.518–526.
6. L.N.Bogdanova, V.R.Bom, **A.V. Kuryakin** et al. Search for the radioactive capture $d+d \rightarrow 4\text{He}+\gamma$ reaction from the $dd\mu$ muonic molecule state. // **ЯФ**, 2002, Том 65, №10, С.1826-1832.



АКУЛИНА

1. A.A.Yukhimchuk, Yu.I. Vinogradov, **A.V. Kuryakin** et al. Gas feeding system supplying the U-400M cyclotron ion source with hydrogen isotopes. // **Fusion Science and Technology**, July/August 2005, Vol.48, Num.1, P.704-707.
2. Ю.И. Виноградов, **А.В. Курякин** и др. Система контроля и управления комплекса тритиевой мишени для исследования экзотических нейтронно-избыточных ядер. // **ВАНТ**, «Физика ядерных реакторов», вып. 1/2, 2002, С.197-200.
3. A.A.Yukhimchuk, V.V. Perevozchikov, **A.V.Kuryakin** et al. Tritium target for research in exotic neutron-excess nuclei. // **NIM A**, 2003, V.513, No 3, P.439-447.
4. Yu.Ts. Oganessian, A.M. Rodin, **A.V. Kuryakin** et al. Status of ACCULINNA beam line. // **NIM B**, 2003, Vol.204, P.114-118.
5. Yu.Ts. Oganessian, ..., **A.V. Kuryakin** et al. Evidences for resonance states in ^5H . // **Physics Letters B**, 2003, V.556, P.70-75.
6. Ю.Ц. Оганесян, Г.М. Тер-Акопян, Ю.И. Виноградов, **А.В. Курякин** и др. Изучение структуры ультранейтронно-избыточных ядер водорода и гелия с использованием реакций радиоактивных пучков на тритиевой мишени. // **Известия РАН**, Сер. Физическая, 2002, Т. 66, № 5, С.619–624.

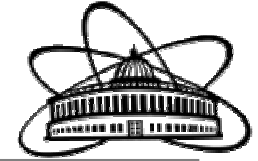


ПРОМЕТЕЙ

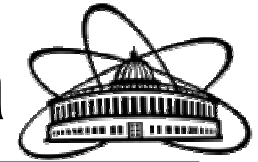
1. Ю.И.Виноградов, **А.В. Курякин** и др. Автоматизированная система контроля, управления и сбора данных стенда "Прометей". // **Материаловедение**, 2002, №1, С.46-50.

Обобщение опыта автоматизации

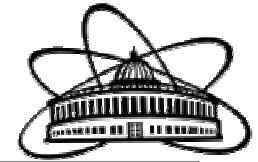
1. **А.В. Курякин**, Ю.И.Виноградов. Программное обеспечение для автоматизации исследовательских установок. // Сборник докладов "IHISM-04", 2005, С.411-419.
2. Yu.I. Vinogradov, **A.V. Kuryakin**. The basic software for "TRITON" and "ACULINA" - the automated tritium complexes. // Proceedings of the International Conference «**μCF-07**», June 18-21, 2007. Dubna, P. 361-368.
3. Yu.I.Vinogradov, **A.V. Kuryakin**, A.A. Yukhimchuk. Measurement and control systems of tritium facilities for scientific research. // **Fusion Science and Technology**, July/August 2005, Vol.48, Num.1, P.696-699.
4. **А.В. Курякин**, Ю.И. Виноградов. Программное обеспечение автоматизированных измерительных систем в области тритиевых технологий. // **ВАНТ**, серия «Термоядерный синтез», 2008 г., выпуск 2, стр. 80-90.



Далее идут слайды - черновики



- Двухкомпонентная структура ПО – базовое+прикладное**
- Многооконный графический интерфейс пользователя**
 - Графики 2D и 3D, таблицы, редакторы, консоли, мнемосхемы
- Система звукового и речевого оповещения**
- Встроенная среда разработки прикладного ПО АСКУ**
 - Редакторы, компиляторы, средства диагностики и отладки
 - Языки программирования DAQ Pascal, DAQ Script, Object Pascal
 - Высокая адаптивность к меняющимся условиям, быстрая разработка
 - Компиляция «на лету» (не прерывая сеанс работы)
- Параллелизм и поддержка распределенных систем**
 - Приоритетная многозадачность: потоки, процессы, машины
 - Распределенные сетевые системы (RS-232/485, CAN, HART, DIM, OPC, WEB, ...)
- Высокая отказоустойчивость**
 - Прикладные программы = виртуальные машины или отдельные процессы
 - Средства самодиагностики, оповещения и восстановления при сбоях
- Учет специфики исследовательских газовых комплексов**
 - Драйверы серийного и специального оборудования тритиевых комплексов
- Средства Online и Offline обработки**
 - Цифровые фильтры, МНК, БПФ, сглаживание, сортировка, сжатие данных
 - Развитая система калибровок измерительных каналов



1. Создана инструментальная среда

- Удовлетворяет пост. требованиям
- Дает **новые возможности** разработки
- Решает **класс задач** автоматизации

2. Автоматизированы установки

- ТРИТОН, АКУЛИНА, ПРОМЕТЕЙ, ...

3. Накоплен методический опыт

- Алгоритмы, прикладное ПО
- База для создания **новых систем**