

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 536.48; 538.9; 546.11.027

ТРИТИЕВАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ДЛЯ ФРАГМЕНТ-
СЕПАРАТОРА АКУЛИНА-2

©2026 г. Р. К. Мусяев*, И. П. Максимкин, В. В. Балуюев,
А. А. Кирдяшкин, О. А. Тивикова, А. В. Рыжухина, В. М. Першина,
Е. В. Буряк, А. В. Вертей, Ал. А. Юхимчук, А. И. Гуркин,
С. В. Фильчагин, О. П. Вихлянцев, Н. Е. Гурин, Д. С. Дроздова,
А. А. Жирунов, Н. В. Катаев, Т. В. Пешехонова, Ар. А. Юхимчук**

*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский
институт экспериментальной физики*

Россия, 607188, Саров Нижегородской обл., просп. Мира, 37

**E-mail: rmusyaev@rambler.ru*

***E-mail: arkad@triton.vniief.ru*

Поступила в редакцию 23.04.2026

После доработки 12.07.2026

Принята к публикации 12.08.2026

Для изучения нейтронно-избыточных ядер в РФЯЦ-ВНИИЭФ разработана тритиевая инфраструктура для безопасной работы специализированного оборудования с целью наполнения физических криогенных мишеней с определенной плотностью трития (в газовых и жидких фазах) при проведении ядерно-физических исследований на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА-2 в ЛЯР ОИЯИ. Представлены структура и принципы работы системы тритиевого обеспечения, а также состав и функциональные возможности основных составных частей: системы очистки газовой смеси, изолированной в перчаточном боксе системы утилизации с генератором и ловушкой трития, системы наполнения с криогенной мишенью в составе транспортируемого мишенного блока и автоматизированной системы контроля и управления инфраструктурой. Рассмотрены характеристики и особенности составных частей тритиевой инфраструктуры, позволяющие осуществлять различные режимы безопасной эксплуатации, включая наполнение и охлаждение/отепление криогенной мишени.

Ключевые слова: тритий, жидкотритиевая криогенная мишень, газовакуумная инфраструктура, радиометрический контроль.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты с радиоактивными пучками с использованием криогенных мишеней изотопов водорода, включая тритий, для изучения экзотических ядер вблизи границ

нуклонной стабильности проводились в ЛЯР ОИЯИ на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА при ускорителе У-400М с конца 90-х годов прошлого столетия [1–9]. С целью дальнейшего и более углубленного исследования структуры уровней экзотических ядер и каналов их распада в 2018 году был запущен фрагмент-сепаратор АКУЛИНА-2, который сопоставим по своим характеристикам с зарубежными аналогами [10]. В первых экспериментах на этом фрагмент-сепараторе с криогенной газовой дейтериевой мишенью были получены новые данные по тяжелым изотопам водорода ^5H [11] и ^7H [12, 13]. Использование криогенных мишеней с зеркальными изотопами ^3H – ^3He позволит существенно расширить диапазон изучаемых экзотических ядер. Например, в ядерных реакциях передачи двух нуклонов (t, p) и ($^3\text{He}, n$) можно исследовать целый ряд малоизученных систем на границах ядерной стабильности: ^{4-7}H , $^{7,8,10}\text{He}$, ^{13}Li вплоть до $^{24,26}\text{O}$.

Первая версия комплекса с системой тритиевого обеспечения (СТО) вместе с уникальными криогенными тритиевыми мишенями [6, 7], созданными в РФЯЦ–ВНИИЭФ, применялась для исследования экзотических ядер на фрагмент-сепараторе АКУЛИНА в начале 2000-х годов [5, 8, 9]. Основным недостатком данной системы было ограничение по количеству трития $3.7 \cdot 10^{13}$ Бк (1 кКи), что не всегда позволяло полностью заполнить мишень жидким тритием и, соответственно, получить корректную статистику. Для нового фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 была разработана специальная тритиевая инфраструктура с СТО второго поколения, которая отвечает современным требованиям радиационной безопасности [14] и позволяет проводить работы с количеством трития до $1 \cdot 10^{14}$ Бк (2.7 кКи).

2. СИСТЕМА ТРИТИЕВОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Комплекс с системой тритиевого обеспечения, интегрированный в инфраструктуру установки АКУЛИНА-2, обеспечивает прежде всего безопасность выполнения процедур наполнения криогенных мишеней тритием, а также их штатную эксплуатацию, включая техническое обслуживание, монтажные работы, хранение и утилизацию. Тритиевый комплекс размещен в специальном помещении над реакционной камерой (РК) внутри стендового зала установки АКУЛИНА-2. Внешний вид комплекса, смонтированного в помещении II класса работ с открытыми источниками ионизированного излучения, показан на рис. 1. В 2024 году тритиевый комплекс введен в эксплуатацию и осуществлен “холостой сеанс”, в ходе которого проведен полный цикл работ, включая монтаж мишенного блока в реакционную камеру и заполнение мишени жидким дейтерием путем его ожижения.

Рис. 1.

В тритиевый комплекс входят следующие основные составные части:

- автономный мишенный блок (БМ), перемещаемый из вытяжного шкафа (на стадии монтажа и подготовки) в реакционную камеру (на стадии эксплуатации);
- система утилизации (СУ) с металлгидридными генераторами трития, размещенная в перчаточном боксе;
- система очистки, включающая блок газоочистки (ГО) с накопительным ресивером и перчаточный бокс, соединенные распределенной газовакуумной системой для организации циркуляции газовой среды и последующего ее вакуумирования.

Регистрация физических параметров и мониторинг текущего состояния составных частей инфраструктуры тритиевого комплекса осуществляется автоматизированной системой контроля и управления (АСКУ).

С помощью разветвленной системы вакуумирования и циркуляции газовой среды, в которую входят также вакуумные посты, тритиевый комплекс позволяет проводить очистку газовой среды от влаги и трития через блок тритиевой очистки СТРУНА (система тритиевой утилизации на адсорберах), действующий по принципу молекулярного сита. Принципиальная газовакуумная схема системы тритиевого обеспечения показана на рис. 2. На выходе из блока ГО во внутреннем циркуляционном контуре перчаточного бокса и на выхлопе в вентиляцию проводится контроль объемной активности (ОА) трития в потоках газовой среды.

Рис. 2.

В инфраструктуру системы очистки входят накопительный ресивер (объемом 0.5 м³) и блок газоочистки СТРУНА, который, благодаря разветвленным коммуникациям, позволяет при различных режимах работы проводить очистку как самого ресивера, так и при необходимости перчаточного бокса.

Контроль режимов работы тритиевого комплекса, регистрацию показаний датчиков и управление работой всех автоматизированных клапанов осуществляет АСКУ, сопряженная с системой радиометрического контроля (включая контроль ОА трития в воздухе помещения), которая базируется на блоках радиометрического контроля на базе радиометров с ионизационными камерами. Комплекс оснащен четырьмя блоками детектирования (БД): в коммуникации внутренней циркуляции перчаточного бокса, два блока с различными диапазонами измерений ОА газа на выходе из блока ГО и на выхлопе газовакуумных коммуникаций в вентиляцию.

Порядок очистки газовой среды перчаточного бокса таков:

- в штатном режиме при работе СУ с БМ в изолированном боксе непрерывно проводится внутренняя циркуляция газовой среды (азота/воздуха), а также измерение влажности и ОА трития в газовом потоке с помощью радиометра;
- при возникновении утечки трития появляется сигнал от БД₁ бокса, который посредством АСКУ управляет соединением бокса через основные трубопроводы с блоком ГО, образуя замкнутый контур очистки;
- циркулирующий по замкнутому контуру газ проходит в блоке ГО через конвертер с катализатором и адсорбер на основе цеолита и очищается от влаги и трития до тех пор, пока ОА среды в боксе и на выходе из ГО (по показаниям БД₃ и БД₄) не снизится до требуемого безопасного уровня;
- после очистки газовой среды система с помощью АСКУ автоматически переключается на штатный режим с внутренней циркуляцией среды в боксе.

Давление газовой среды в боксе и основных коммуникациях комплекса во всех режимах работы всегда автоматически поддерживается ниже атмосферного (в диапазоне от –200 до –600 Па). Это делается для того, чтобы исключить выход трития в помещение. При этом технологический сброс газа из бокса и коммуникаций происходит в ресивер, после заполнения которого проводится его очистка через блок ГО.

Инфраструктура при работе с тритием обеспечивает не менее трех рубежей защиты при штатной эксплуатации БМ и СУ: два рубежа обеспечиваются конструкцией функциональных элементов криомишеней и генератора/ловушки трития, а третий рубеж – это объемы перчаточного бокса, РК или кожуха системы наполнения БМ, соединяемые с блоком ГО или ресивером в случае аварийной ситуации (выход трития в объем с ОА газовой среды, превышающей допустимый уровень).

3. СИСТЕМА ОЧИСТКИ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

Одной из основных частей инфраструктуры тритиевого комплекса является блок газоочистки [15], газовакуумная схема которого представлена на рис. 3. Блок ГО серии СТРУНА, изготовленный в РФЯЦ-ВНИИЭФ, предназначен для поддержания следующих параметров газовой среды в перчаточном боксе и ресивере: ОА по тритию в газовой среде – не более $5 \cdot 10^5$ Бк/м³; по водяному пару – не более 10 ppm. Такие блоки ГО используются в ряде систем тритиевой очистки РФЯЦ-ВНИИЭФ, они показали свою эффективность.

Рис. 3.

Газовая среда с входа ГО, пройдя через каталитический конвертер, где происходит окисление трития до формы НТО на палладиевом катализаторе (АПН ТУ 6-02-7-228-89) при

температуре 350–400 °С, выходит нагретой; затем поток газа охлаждается в теплообменнике и поступает на адсорберы, где в процессе фильтрации потока газа через пористую насыпную среду из гранул сорбента – цеолита NaX (молекулярное сито) – происходит поглощение влаги (в обычной или тритированной форме). После этого очищенная от трития и влаги газовая среда прокачивается воздуходувкой и охлаждается дополнительным газовойодяным теплообменником.

Конструкция ГО позволяет запустить в работу сразу две линии очистки с адсорбентом в каждой. Эти линии очистки могут быть соединены последовательно или параллельно. Вторая (резервная) линия очистки обычно используется в том случае, если эффективность первой линии недостаточна из-за заполнения адсорбера влагой. Кроме того, вторая линия может использоваться в качестве основной, если первая линия выведена из эксплуатации для проведения ее технического обслуживания.

Определяя периодически приращение массы адсорберов с помощью тензодатчиков веса и используя стационарные показания ОА газовой среды на выходе из ГО (циркуляция газа приводит к выравниванию ОА на входе и выходе), можно получить оценку количества поглощенного трития и принять решение о необходимости замены заполненного адсорбера. В дальнейшем заполненный адсорбер (либо по массе влаги в цеолите, либо по предельному уровню ОА трития) запечатывается и перевозится на переработку или утилизируется как контейнер с твердыми радиоактивными отходами.

4. СИСТЕМА УТИЛИЗАЦИИ

В перчаточном боксе (Vbox-Pro 1000 производства Vilitek, Россия) размещена система утилизации на базе проточных металлгидридных генераторов/ловушек трития, запорной арматуры, средств измерения и других элементов газовакуумных коммуникаций (рис. 4). Транспортировка элементов СУ в бокс осуществляется через шлюз, который может откачиваться отдельным насосом в ресивер или спецвентиляцию.

Рис. 4.

Размещенная внутри перчаточного бокса СУ предназначена для заполнения тритием генератора BS₁ в БМ из генератора BS₂ и последующей утилизации трития из коммуникаций БМ и СУ в генератор-ловушку BS₃. Для эффективного поглощения трития на ловушку, а также очистки газа генератора от радиогенного гелия в СУ предусмотрена возможность замкнутой циркуляции газовой смеси путем использования малогабаритного форвакуумного насоса NL₅ в качестве побудителя потока.

Генератор трития BS_2 в СУ построен на базе конструкции проточной металлгидридной ловушки, включающий в себя ампулу с сорбентом на основе урана-238, два собственных ручных вентиля и датчик абсолютного давления с пределом измерений до 0.16 МПа. Максимальная емкость генератора BS_2 по газу составляет 2 л (при нормальных условиях). Между внутренней ампулой и внешним корпусом генератора при его нагреве проводится откачка полости, где может скапливаться продифундированный сквозь стенки газ.

Генератор-ловушка BS_3 для трития и примесей (конструкция проточной ловушки) в СУ включает в себя внутреннюю ампулу с сорбентом на основе урана-238, два собственных ручных вентиля и датчик абсолютного давления с пределом измерений до 0.16 МПа. Максимальная емкость ловушки BS_3 по газу составляет 15 л (при нормальных условиях).

Генератор BS_2 и ловушка BS_3 смонтированы на герметичных портах в основании камеры перчаточного бокса и имеют водяное охлаждение фланцев. Снаружи камеры бокса у основания на корпуса BS_2 и BS_3 надеты кожухи с электронагревателями и встроенными в них датчиками температуры T_3 и T_6 (термопары типа ХА) соответственно. Работоспособность данных конструкций генераторов-ловушек проверена годами и использовалась в исследовательских комплексах ЛЯР и ЛЯП ОИЯИ [5–7, 16].

На монтажной панели у задней стенки бокса установлены коммуникации СУ с запорной арматурой и датчиками давления: вакуумный датчик DD_{11} и датчик давления DD_9 (с пределом измерений до 0.16 МПа и погрешностью 0.25%). Для точного измерения количества используемого в работе трития в контур СУ включены емкости CV_3 и CV_4 вместимостью 500 и 750 см³ с соответствующими датчиками температуры T_4 и T_5 на стенках емкостей. Снаружи под камерой бокса смонтирован вакуумный пост для откачки БМ и остаточного газа из СУ на ресивер.

Управление узлами и элементами СУ, кроме технологических ручных вентилей на генераторе и ловушке, осуществляется дистанционно через АСКУ с использованием мнемосхемы СУ интерфейса программного обеспечения CRW-DAQ на управляющем компьютере.

5. МИШЕННЫЙ БЛОК

Мишеный блок конструктивно состоит из системы наполнения (СН), мишенной сборки с тритиевой мишенью (ТМ) и головки криорефрижератора, установленной коаксиально относительно корпуса кожуха СН. Вид конструкции и принципиальная газовакуумная схема БМ показаны на рис. 5.

Рис. 5.

Система наполнения мишени расположена в кольцевой полости герметичного кожуха, вакуумируемого через фланцевое соединение C_1 с контролем герметичности по манометру M_1 и представляющего собой дополнительный рубеж защиты в случае разгерметизации внутренних коммуникаций. Коаксиально вдоль оси располагается внутренняя стенка кожуха в виде цилиндрического канала (для размещения криоголовки), к которой приварены верхняя и нижняя крышки кожуха. На верхнюю крышку кожуха выведены маховики управления вентилями, фланцы для стыковки с СУ и вакуумным постом, а также электрические разъемы для подключения датчиков и нагревателя генератора BS_1 . В нижней крышке кожуха, которая изготовлена в виде фланца для стыковки к РК, выведен трубопровод с геттером $ГТ_2$ и капилляром для наполнения ТМ.

Генератор трития BS_1 системы наполнения мишени, показанный на рис. 6, представляет собой корпус с ручным вентилем на крышке, кольцеобразной ампулой с сорбентом на основе урана-238, которая герметично приварена к крышке корпуса. Полость между ампулой и стенкой корпуса генератора связана через капилляр с геттером $ГТ_1$ для сорбции продиффундировавшего через ампулу трития. В корпус генератора коаксиально устанавливается стержневой электронагреватель с термодатчиком T_1 .

Рис. 6.

Для вывода из генератора BS_1 необходимого количества трития используются буферные емкости CV_1 и CV_2 объемом 750 и 300 см³ соответственно, соединенные между собой вентилем $ВП_1$, а также датчик давления DD_1 . Температура стенок буферных емкостей контролируется с помощью термодатчика T_2 . Для выпуска газа из буферных емкостей на мишень ТМ при эксплуатации в РК используется вентиль $ВП_3$, а для соединения СН с СУ через фланцевое соединение C_2 в вытяжном шкафу – вентиль $ВП_4$.

Тритиевая мишень крепится на специальных ложементах (рис. 7) и конструктивно имеет два рубежа защиты [17], предотвращающих выход трития из объема мишени в РК. Для поглощения выделившегося трития в случае разгерметизации ТМ полость между рубежами защиты соединена с титановым геттером $ГТ_2$.

Рис. 7.

К рабочему торцу криоголовки, установленной коаксиально на кожухе СН (рис. 5), через холодильник крепится сборка с мишенью, которая окружена защитными экранами (нижним и верхним), закрепленными с корпусом криоголовки через проставку. Между верхним торцом ложемента (см. рис. 7) сборки мишени и холодильником установлен

омический нагреватель для стабилизации температуры мишени. Тепловой контакт между фланцами экранов и проставки, торцами холодильника и сборки мишени обеспечивается благодаря использованию индиевых прокладок.

В начале работы корпус кожуха СН с установленным коаксиально криогенным рефрижератором закрепляется на монтажной площадке вытяжного шкафа, расположенного прямо над реакционной камерой. На криоголовке проводится монтаж мишенной сборки с последующей установкой защитных экранов, а СН Эодсоединяется к СУ с помощью специальных защищенных коммуникаций. После проверки герметичности и заполнения тритием из СУ генератора BS_1 БМ отсоединяется от СУ и закрепляется на тросах электрической лебедки, с помощью которой БМ через отверстие на дне вытяжного шкафа опускается вниз к РК, где и происходит его эксплуатация.

Работоспособность БМ и всей СТО была проверена в ходе “холостого сеанса” после заполнения генератора в СН водородом, транспортировки и монтажа БМ в РК, охлаждения мишени до температуры 17 К и заполнения мишени жидким тритием. График процессов охлаждения, стабилизации температуры и отепления показан на рис. 8.

Рис. 8.

6. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Автоматизированная система контроля и управления предназначена для регистрации состояния и управления функциональными элементами системы тритиевого обеспечения в ручном (по командам оператора) и автоматическом режимах. Программное обеспечение АСКУ базируется на пакете CRW-DAQ [18, 19], предназначенном для автоматизации экспериментальных установок и физических измерений, и обеспечивает работу с различными модулями аналогового и цифрового ввода/вывода, позволяет обрабатывать и отображать измеряемые данные в текстовой и графической формах в режиме реального времени, а также строить и использовать пользовательский интерфейс для управления программой в удобной для оператора форме в виде активных графических мнемосхем и окон настройки.

ПО АСКУ комплекса обеспечивает

- непрерывный дистанционный мониторинг основных физических параметров комплекса (давления, температуры, ОА среды, состояния клапанов, нагревателей и т.д.) с отображением результатов на экране монитора управляющего компьютера в виде мнемосхем и графиков;
- управление основными узлами комплекса по командам оператора;

- оповещение персонала об изменениях, происходящих в работе инфраструктуры (например, о срабатывании блокировок) путем подачи звуковых сигналов и речевых сообщений, а также отключения электропитания и закрытия определенных коммуникаций в аварийных случаях;

- непрерывное сохранение данных измерений в файлах на жестком диске управляющего компьютера с резервным копированием на другой дистанционно удаленный компьютер.

Основная мнемосхема АСКУ представлена на рис. 9, она полностью соответствует принципиальной газовакуумной схеме системы тритиевого обеспечения. Измеряемые величины (температура, давление, ОА и др.), а также состояния контролируемых элементов отображаются на мнемосхеме в режиме реального времени. Управление функциональными элементами тритиевого комплекса производится нажатием курсора на активные области (сенсоры) мнемосхемы. Например, по нажатию на основной мнемосхеме сенсора “ГО” открывается окно контроля и управления газоочисткой. На рис. 10 показаны примеры графических интерфейсов и окон настроек (контроль нагревателей, радиометрический контроль, система тритиевой газоочистки и т.п.).

Рис. 9.

Рис. 10.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тритиевая инфраструктура для установки фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2 разработана для обеспечения безопасного функционирования, обслуживания и постоянного снабжения тритием системы наполнения мишенного блока с целью заполнения им криогенных мишеней (в газовой или жидкой фазе), а также для проведения радиометрического контроля газовой среды и утилизации радиоактивных отходов. Кроме того, инфраструктура тритиевого комплекса под автоматизированным управлением и контролем обеспечивает очистку газовой среды от трития до уровня ОА не более $5 \cdot 10^5$ Бк/м³. При этом система радиометрического контроля трития в боксе и газовакуумных коммуникациях работает в режиме реального времени и позволяет проводить учет баланса трития. В 2024 году выполнен ввод тритиевого комплекса в эксплуатацию и осуществлен “холостой сеанс”, в ходе которого проведен полный цикл работ, включая монтаж мишенного блока в реакционную камеру и заполнение мишени жидким тритием путем его ожижения.

Работа выполнена в рамках научной программы национального центра физики и математики по направлению № 8 “Физика изотопов водорода”.

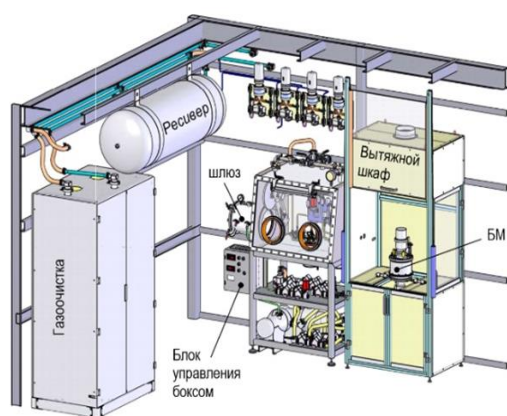
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Casten R.F., Sherrill B.M.* Prog. Part. Nucl. Phys. 2000. V. 45. P. S171. [https://doi.org/10.1016/S0146-6410\(00\)90013-9](https://doi.org/10.1016/S0146-6410(00)90013-9)
2. *Ter-Akopian G.M., Rodin A.M., Fomichev A.S. et al.* Phys. Lett. B. 1998. V. 426. № 3–4. P. 251. [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(98\)00233-0](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(98)00233-0)
3. *Wolski R., Fomichev A.S., Rodin A.M. et al.* Phys. Lett. B. 1999. V. 467. № 1–2. P. 8. [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(99\)01079-5](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(99)01079-5)
4. *Григоренко Л.В., Головков М.С., Крупко С.А. и др.* УФН. 2016. Т. 186. С. 337. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0186.201604a.0337>
[*Grigorenko L.V., Golovkov M.S., Krupko S.A. et al.* Phys. Usp. 2016. V. 59. P. 321. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0186.201604a.0337>].
5. *Rodin A.M., Sidorchuk S.I., Bogdanov D.D., et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. 2003. V. 204. P.114. URL: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)01897-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01897-9)
6. *Yukhimchuk A.A., Perevozchikov V.V., Apasov V.A. et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2003. V. 513. P. 439. (). URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.06.002>
7. *Юхимчук А.А., Перевозчиков В.В., Анасов В.А. и др.* ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2002. Вып.1/2. С.183. <https://nrcki.ru/files/pdf/VANT-FYAR-2002-1-2.pdf>
8. *Ter-Akopian G.M., Fomichev A.S., Golovkov M.S. et al.* Eur. Phys. J. A. 2005. V.25. P. 315. <https://doi.org/10.1140/epjad/i2005-06-080-6>
9. *Fomichev A.S., Grigorenko L.V., Golovkov M.S. et al.* Eur. Phys. J. A. 2009. V. 42. P. 465. <https://doi.org/10.1140/epja/i2008-10739-6> .
10. *Fomichev A.S., Grigorenko L.V., Krupko S.A., Stepantsov S.V., Ter-Akopian G.M.* Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54. P. 97. <https://doi.org/10.1140/epja/i2018-12528-0>
11. *Nikolskii E.Yu., Muzalevskii I.A., Bezbakh, A.A. et al.* Phys. Rev. C. 2022. V. 105. P. 064605. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.105.064605>
12. *Bezbakh A.A., Chudoba V., Krupko S.A. et al.* Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. P. 022502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.022502>
13. *Muzalevskii I.A., Bezbakh, A.A., Nikolskii E.Yu. et al.* Phys. Rev. C. 2021. V. 103. P. 044313. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.103.044313>
14. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. ОСПОРБ 99/2010.

15. Тивикова О.А., Юхимчук А.А., Максимкин И.П. и др. Сб. докл. конф. “Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами” (IHISM’22-Junior) Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2023. С. 281. <https://elibrary.ru/item.asp?id=64491853>
16. Юхимчук А.А., Анасов В.А., Виноградов Ю.И. и др. ПТЭ. 1999. № 6. С. 17.
17. Фомичев А. С., Безбах А.А., Горшков А.В. и др. Исследования нейтронно-избыточных ядер в реакциях с радиоактивными пучками и криогенной тритиевой мишенью. P7-2025-29 Препринт ОИЯИ. Дубна, 2025. [https://www1.jinr.ru/Preprints/2025/29\(P7-2025-29\).pdf](https://www1.jinr.ru/Preprints/2025/29(P7-2025-29).pdf)
18. Курякин А.В., Виноградов Ю.И. Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW-DAQ). Свидетельство РФ о регистрации программы для ЭВМ №2006612848, 2006 г. <http://crw-daq.su/>
19. Курякин А.В., Виноградов Ю.И. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2008. № 2. С. 80. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11773247>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Тритиевый комплекс в помещении II класса: схема размещения (а) и вид после монтажа (б)
- Рис. 2.** Принципиальная газовакуумная схема системы тритиевого обеспечения: ВП – ручной вентиль, VP – пневмоклапан, VE – электромагнитный клапан, NL – форвакуумный насос, NR₁ – турбомолекулярный насос, DD – датчик давления, М – манометр, Ф – фильтр
- Рис. 3.** Принципиальная газовакуумная схема блока газоочистки СТРУНА: ВП – ручной вентиль, VW – вентиль для воды, АТ₁ – водно-водяной теплообменник, АТ₂ и АТ₃ – газо-водяные теплообменники, А – адсорбер с цеолитом, ВД – воздуходувка, ДВ – датчик влажности газа, ДД – датчик давления, ДПД – дифференциальный датчик давления, ДПВ – датчик потока воды, ДУ – датчик уровня воды, К – конвертер с катализатором и нагревателем, НВ – насос водяной, СЕ – резервуар, Т – температурные датчики, ТДВ – тензодатчики веса, Ф₁ – газовый фильтр, Ф₂ и Ф₃ – водяные фильтры грубой очистки
- Рис. 4.** Принципиальная газовакуумная схема СУ (а) и ее вид в боксе (б): BS₂ и BS₃ – металлогидридные генераторы и ловушки трития, VE – электромагнитные клапаны, ВП – ручные вентили, CV₃ и CV₄ – калиброванные емкости, DD – датчики давления, NL₅ – форвакуумный насос
- Рис. 5.** Вид конструкции и принципиальная газовакуумная схема БМ: BS₁ – генератор трития на уране-238, ГТ₁ и ГТ₂ – титановые геттеры, CV₁ и CV₂ – калиброванные буферные емкости объемом соответственно 750 и 300 см³, ВП₁–ВП₅ – ручные вентили, DD₁ – емкостной датчик давления, Т₁–Т₂ – термодатчики, ТМ – тритиевая мишень
- Рис. 6.** Конструкция генератора трития BS₁ с геттером ГТ₁
- Рис. 7.** Вид (разрезы) мишенной сборки с газовой мишенью (а) и схема коммуникаций ТМ (б): М1, М2 – стальные мембраны толщиной 8 мкм
- Рис. 8.** Изменение температуры в криомишени с тритием в ходе “холостого сеанса”: ТД₁ – на верхнем ложементе, ТД₂ – на нижнем ложементе
- Рис. 9.** Основной графический интерфейс комплекса с системой тритиевого обеспечения
- Рис. 10.** Примеры графических интерфейсов (мнемосхем) и окон настроек



(а)



(б)

Рис.1

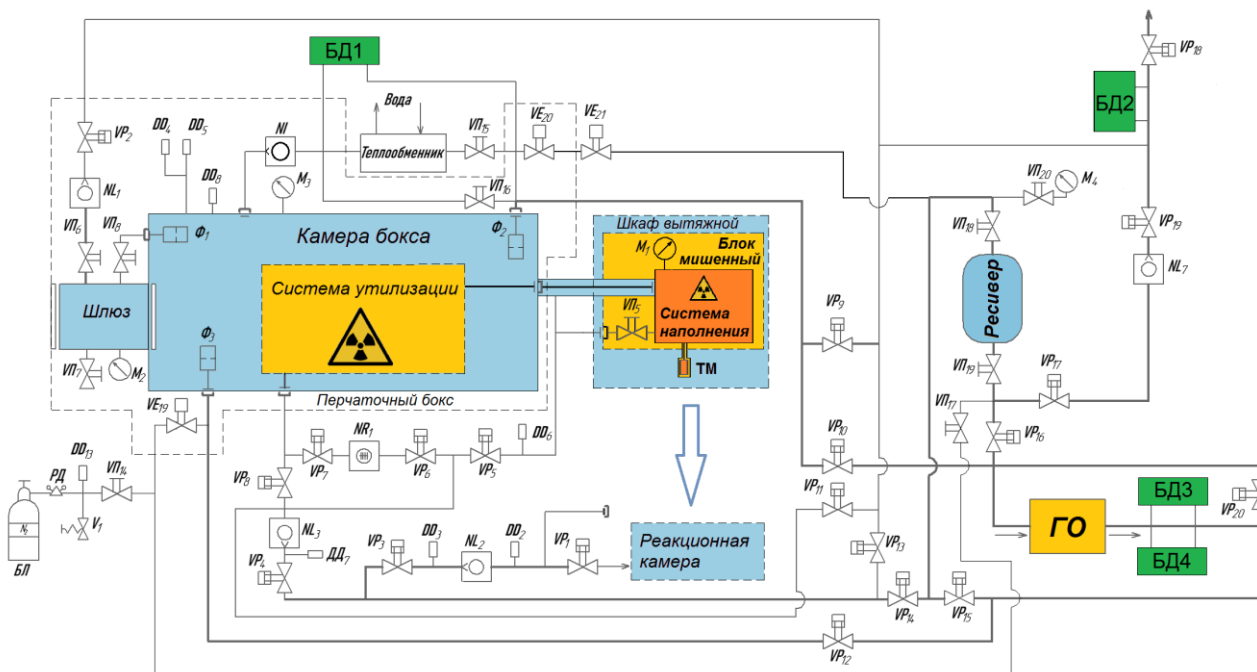


Рис.2

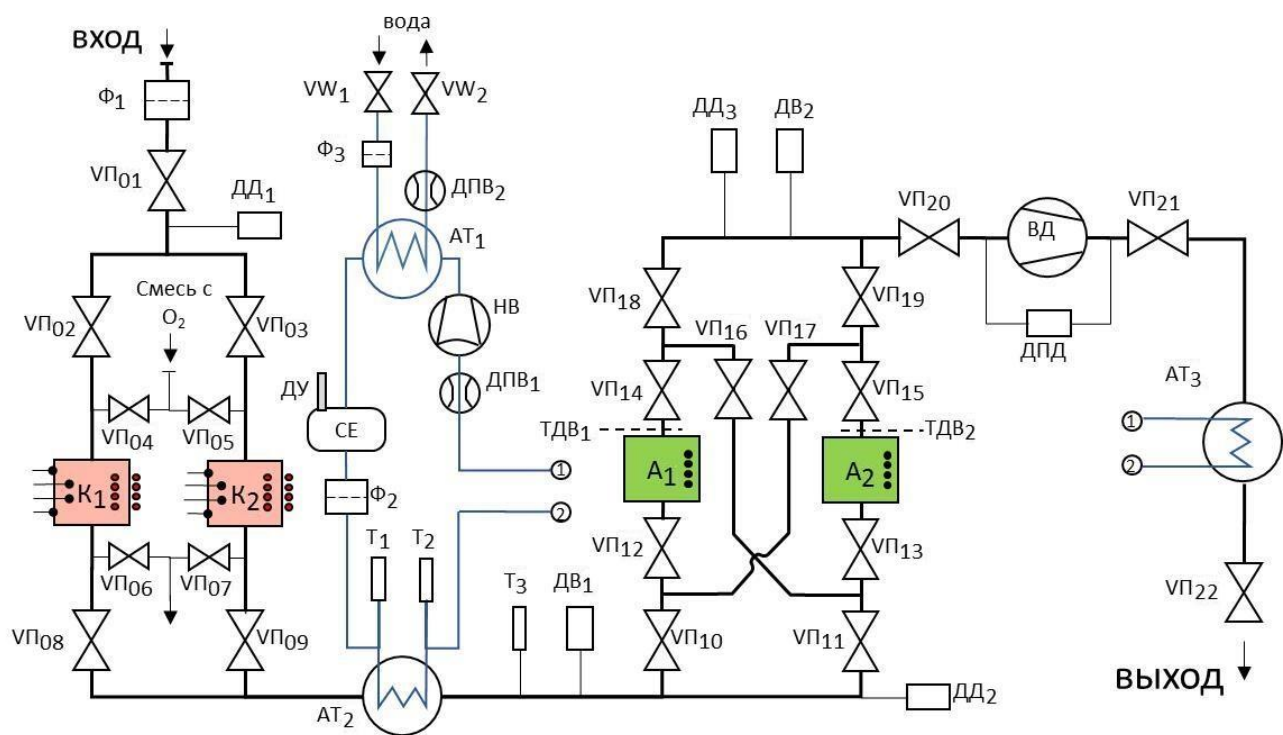
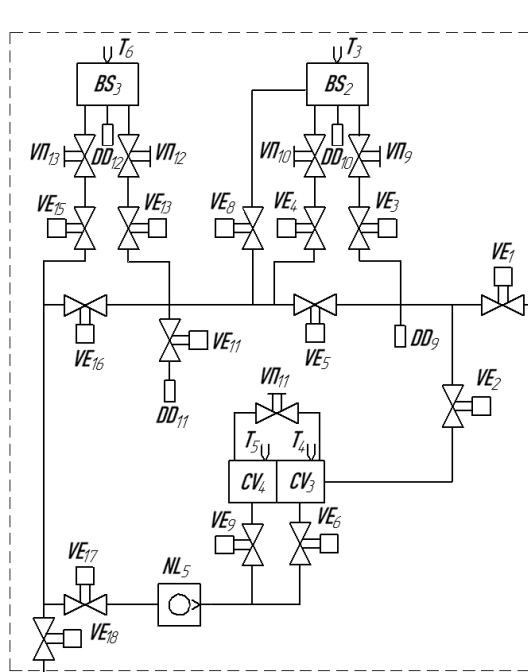
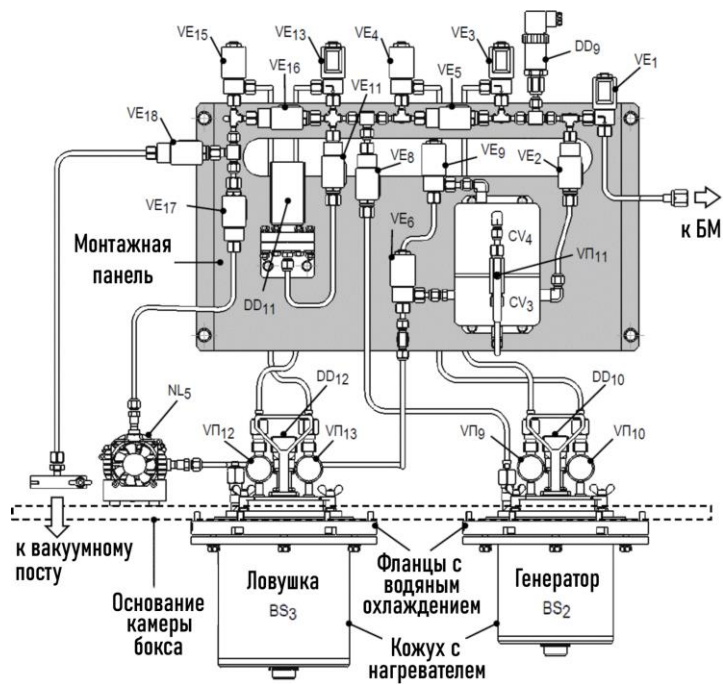


Рис.3



(а)



(б)

Рис. 4.

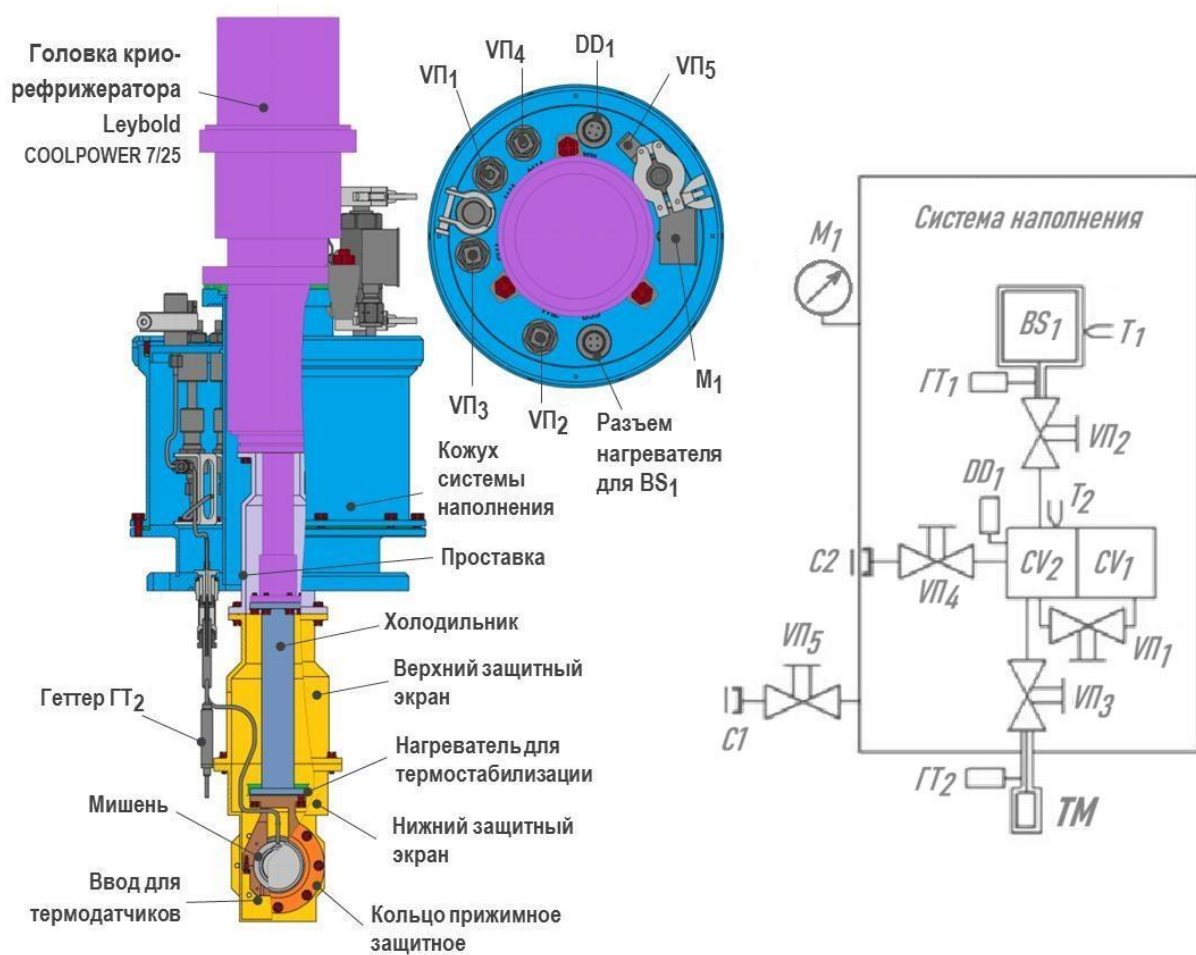


Рис. 5.

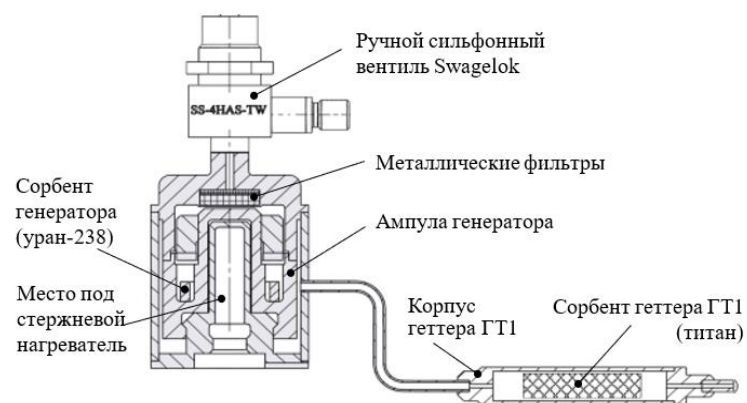


Рис. 6.

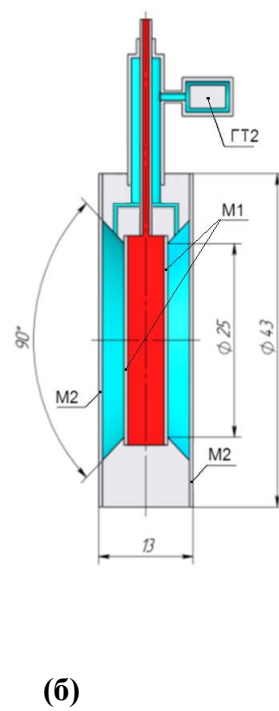
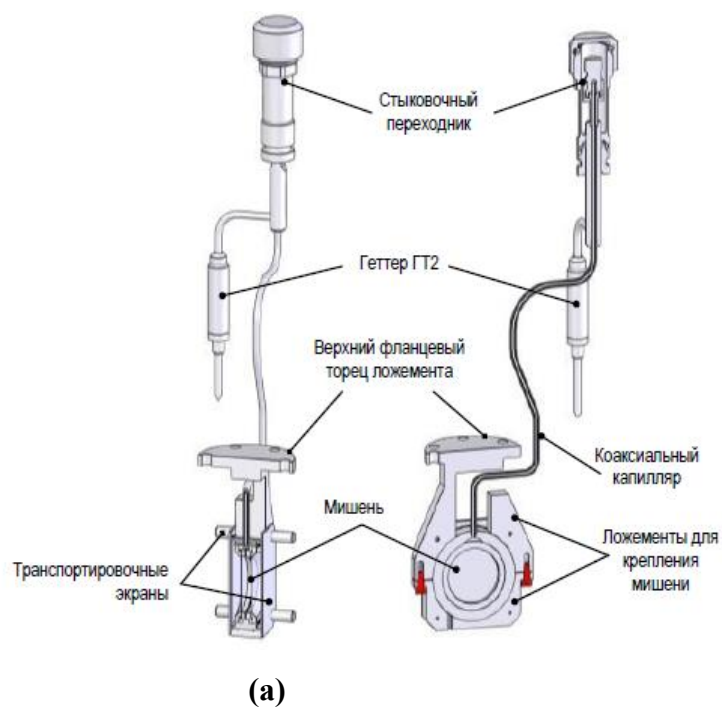


Рис. 7.

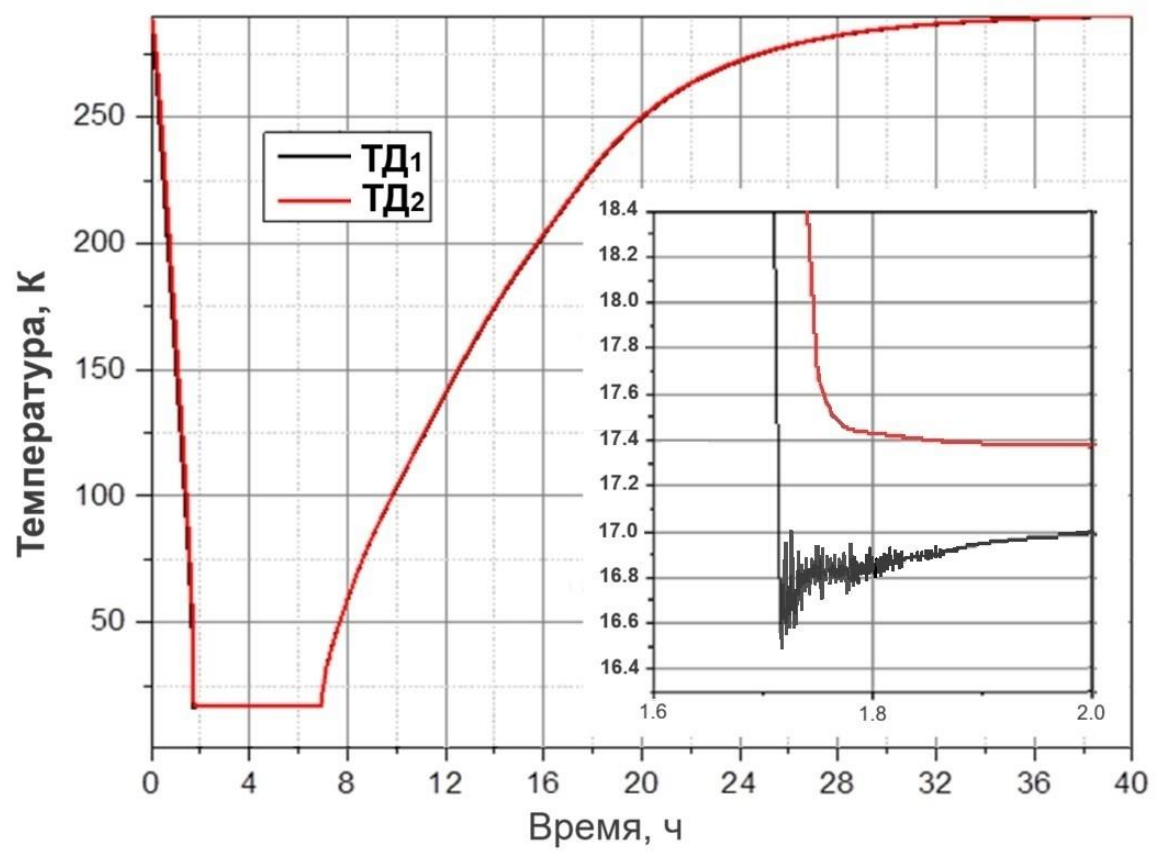


Рис. 8.

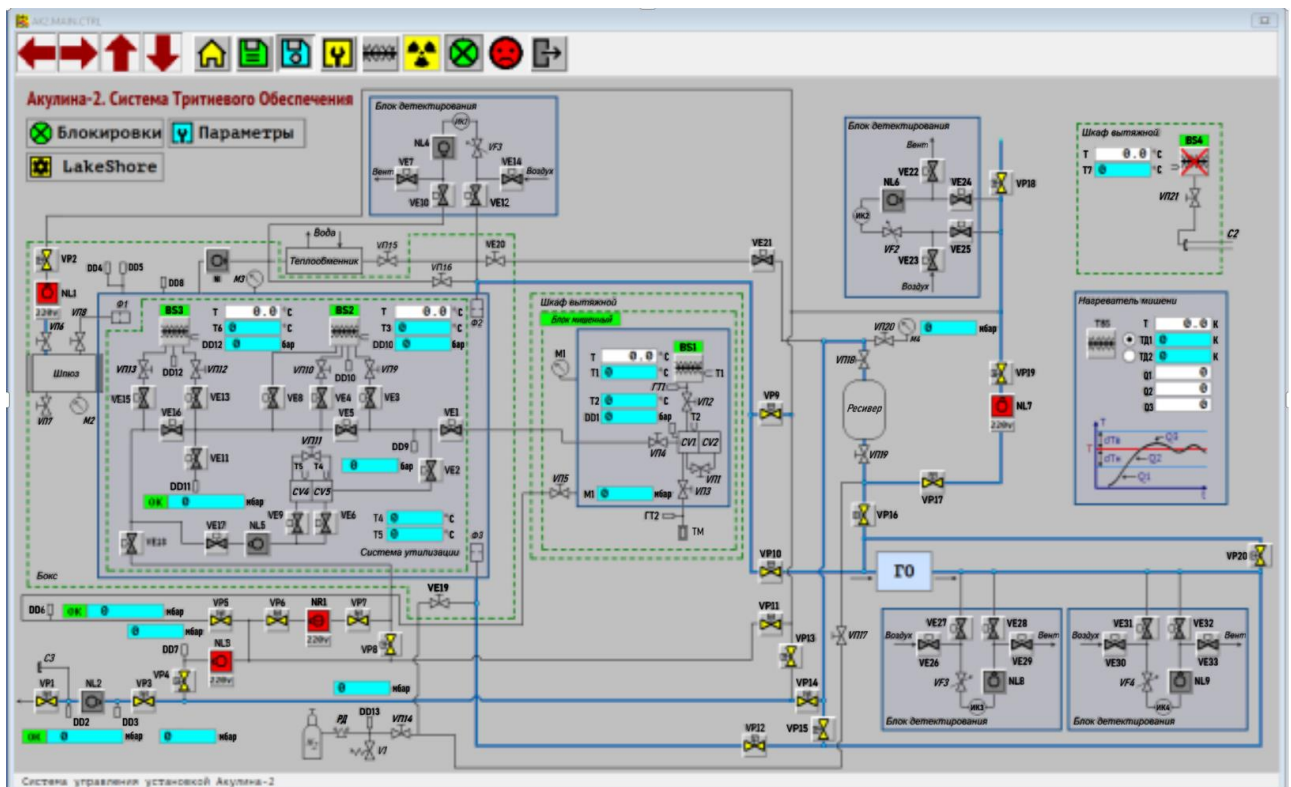


Рис. 9.

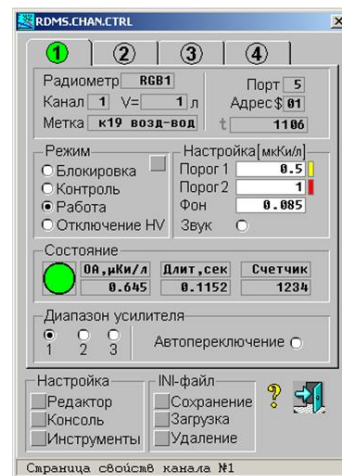
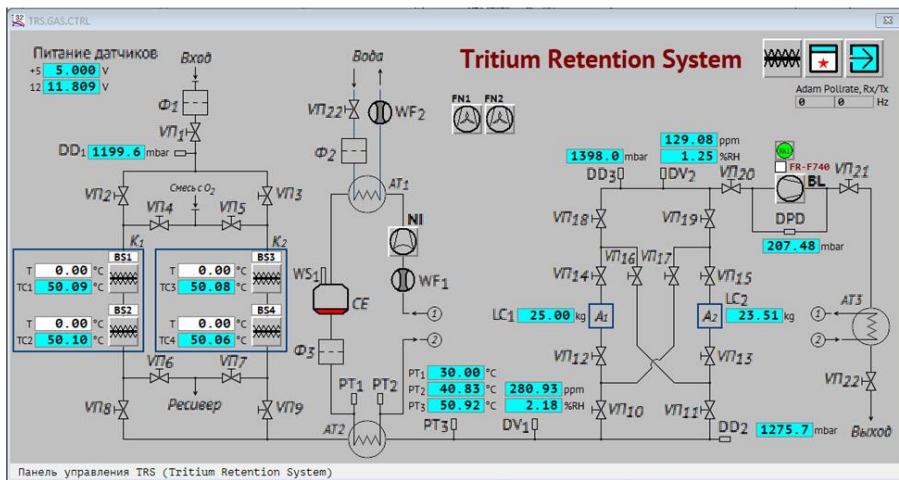
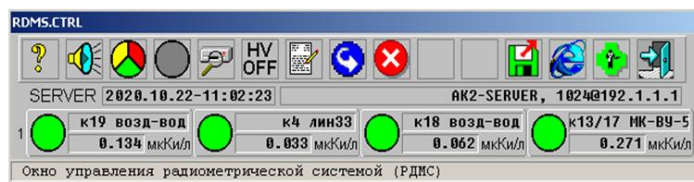
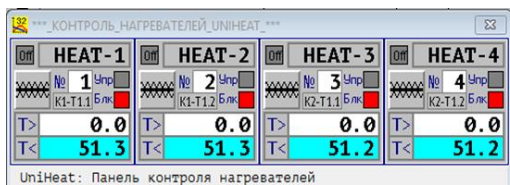


Рис. 10.