

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г. И. БУДКЕРА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

*На правах рукописи*

БАРЛАДЯН АЛЕКСАНДР КОНСТАНТИНОВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ КРИОГЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ  
ДЕТЕКТОРА КЕДР**

01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание учёной степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель  
доктор физико-математических  
наук, профессор  
ТИХОНОВ ЮРИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

НОВОСИБИРСК — 2015

## Содержание

<b>Введение.....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. Криогенное сопровождение научных исследований.....</b>	<b>8</b>
1.1. Криогенные температуры.....	8
1.2. Преимущества криогенных детекторов.....	9
1.3. Криогенная система как объект управления.....	10
1.4. Средства управления криогенным обеспечением.....	17
<b>Глава 2. Детектор КЕДР для экспериментов на ВЭПП-4М.....</b>	<b>23</b>
2.1. Ускорительный комплекс ВЭПП-4М.....	24
2.2. Универсальный детектор КЕДР.....	24
<b>Глава 3. Криогенные компоненты детектора КЕДР.....</b>	<b>27</b>
3.1. Криогенные магниты.....	27
.....	28
3.1.1. Основной сверхпроводящий соленоид.....	29
3.1.2. Компенсирующие сверхпроводящие соленоиды.....	38
3.1.3. Этапы ввода магнитной системы в работу.....	42
3.2. Криогенный калориметр.....	43
3.2.1. Криптоновый криостат.....	46
3.2.2. Теплоизоляция.....	47
3.2.3. Измерители температуры.....	49
3.2.4. Этапы ввода калориметра в работу.....	50
<b>Глава 4. Криогенное обеспечение детектора КЕДР.....</b>	<b>51</b>
4.1. СТГ — система термостатирования гелиевая.....	53
4.1.1. БПТВ — блок питания токовых вводов.....	56
4.1.2. Токовводы.....	57
4.1.3. РГ — рефрижератор гелиевый.....	58
4.1.4. Поршневой детандер.....	59

4.2. СТА — система термостатирования азотная.....	60
4.2.1. Буферные хранилища.....	62
4.3. СХКр — система хранения и выдачи жидкого криптона.....	64
4.4. СХА — система хранения и выдачи жидкого азота.....	66
4.5. Система пневмоуправления.....	69
4.6. Криогенная станция.....	72
<b>Глава 5. Аппаратное обеспечение дистанционного управления.</b>	<b>76</b>
5.1. Телеметрия и контроль.....	76
5.1.1. Измерение температуры.....	80
5.1.2. Измерение давления.....	81
5.1.3. Измерение уровня.....	84
5.1.4. Измерение расхода.....	86
5.1.5. Измерение перемещений.....	87
5.1.6. Измерение частоты оборотов.....	91
5.1.7. Контроль положения регуляторов.....	92
5.1.8. Контроль пороговых состояний.....	92
5.2. Дистанционное управление.....	93
5.2.1. Управление электромеханическими устройствами.....	95
5.2.2. Контроллер поршневого детандера.....	96
5.2.3. Пневмоуправление.....	97
5.2.4. Подключение вакуумных ресиверов.....	101
5.3. Вычислительный комплекс.....	103
<b>Глава 6. Программное обеспечение криокомплекса.....</b>	<b>109</b>
6.1. Вычислительная платформа.....	109
6.2. Взаимодействие с аппаратурой.....	110
6.3. Архитектура программного обеспечения.....	112
6.3.1. Системное программное обеспечение.....	113
6.3.2. Прикладное программное обеспечение.....	114

6.4. Активные мнемосхемы.....	115
6.4.1. Активация двухпозиционного клапана.....	117
6.4.2. Активация регулирующих клапанов.....	119
6.4.3. Представление криогенных сосудов.....	119
6.5. Вспомогательный дистанционный мониторинг.....	120
6.6. Интернет-публикации.....	121
6.6. Архивирование и База данных эксперимента.....	121
6.7. Графический анализатор в приложении goot.....	122
<b>Глава 7. Методика управления криокомплексом.....</b>	<b>124</b>
7.1. Управление рефрижератором.....	124
7.2. Управление поршневым детандером.....	125
7.3. Управление криптоновым калориметром.....	134
7.4. Оптимизация технологических процессов.....	135
7.4.1. Газификатор жидкого азота.....	135
7.4.2. Стабилизация режимов рефрижератора.....	137
7.4.3. Приём жидкого гелия.....	137
7.4.4. Прочее.....	138
<b>Заключение.....</b>	<b>140</b>
<b>Литература.....</b>	<b>143</b>



## Введение

В изучении фундаментальных свойств материи важнейшим инструментом современной экспериментальной физики высоких энергий служат универсальные детекторы на ускорителях встречных пучков заряженных частиц. Детектор представляет собой систему прецизионных быстродействующих приборов регистрации, идентификации и измерения параметров (координат, импульса, энергии и др.) нейтральных и заряженных частиц вокруг точки столкновения пучков. Универсальность даёт возможность вести разноплановые исследования по целому комплексу актуальных проблем физики элементарных частиц.

Использование в детекторах криогенных техники и технологий позволяет достичь существенных преимуществ. В то же время, специфика работы с веществом при низких температурах требует специализированного управления криогенными компонентами детектора. Их интеграция с системами криогенного обеспечения позволяет реализовать непрерывный контроль и целенаправленное изменение параметров различных технологических процессов: перемещения и хранения криопродуктов, захолаживания до криотемператур, заправки, длительного криостатирования, опорожнения и отогрева криогенного оборудования и других.

В ИЯФ СО РАН создан и полномасштабно эксплуатируется с 2004 года комплекс криогенного обеспечения универсального детектора КЕДР: с энергоёмкими блоками и агрегатами большой единичной мощности, большой массой расходуемых и запасённых криогенных газов и жидкостей (криптона, гелия, азота), большим количеством контролируемых параметров и исполнительных устройств, взаимосвязанными технологическими процессами с дистанционным управлением.

Отличительной особенностью криогенного комплекса детектора КЕДР

является наличие гелиевого рефрижератора сателлитного типа с поршневым детандером, а также длительное хранение большого запаса дорогостоящего сконденсированного криптона в криостате с низким рабочим давлением (1,2 атм., абсолютное).

Расположение детектора КЕДР на ускорительном комплексе ВЭПП-4М затрудняет свободный доступ человека к элементам криогенных систем вблизи него на протяжении длительных циклов экспериментов с ускоренными пучками, что объясняет необходимость организации дистанционного управления криогенным оборудованием.

**Целью** диссертации явилось создание средств и методов дистанционного управления криогенным комплексом жидкокриптонового калориметра и сверхпроводящих соленоидов детектора КЕДР.

**На защиту вынесены следующие положения.**

Система контроля и управления криокомплекса детектора КЕДР с центральным постом оператора-технолога разработана и реализована на основе персональных ЭВМ и сопряжённых с ними криогенных, электронных преобразователей и исполнительных устройств.

Программное обеспечение управления в реальном времени криокомплексом детектора КЕДР разработано и функционирует в вычислительной среде (GNU/Linux, англ.) с открытым, свободно доступным исходным кодом.

Разработка мнемосхем на основе принципиальных пневмогидравлических схем криогенного комплекса существенно упрощает управление его технологическими режимами в реальном времени.

Микроконтроллерное управление параметрами рабочего цикла поршневого детандера обеспечивает возможность их оперативной

дистанционной коррекции в переходных режимах гелиевой криогенной системы (рефрижератора), и, тем самым, его стабильную работу, дающую двукратную экономию суточного объёмного расхода жидкого гелия — до пятисот литров.

## Глава 1. Криогенное сопровождение научных исследований

### 1.1. Криогенные температуры

Диапазон криогенных температур определён как диапазон существования в жидком виде ряда веществ, имеющих промышленное применение: гелия, водорода, продуктов разделения воздуха, природного газа и благородных газов. По международной классификации, к криогенным относятся температуры ниже 120 К [1]. Температуры ниже 3 К называют сверхнизкими.

История практического освоения криогенных температур до самой окрестности абсолютного нуля началась с открытия в 1908 году способа получения жидкого гелия голландцем Хейке Камерлинг-Оннесом. Он первый разработал и метод промышленного получения жидкого водорода; достиг в 1910 году температуры 1,04 К [2], а в 1926 году — 0,7 К [3]; открыл в 1911 году эффект сверхпроводимости. Ранние признанные мировой наукой отечественные фундаментальные изобретения и открытия в этой области связаны с именем академика П. Л. Капицы [4].

Из-за высоких стоимости криогенного оборудования, его обслуживания и энергозатратности получения криогенного продукта, разработка криогенных комплексов исторически [4] осуществлялась, в основном, в интересах крупных предприятий химической промышленности, металлургии и ракетостроения, затем [5] машиностроения, энергетики, электроники: для выработки в промышленном масштабе кислорода, водорода и прочих веществ.

Современный уровень развития криогенных техники и технологий в мире позволяет осуществлять их широкое применение в научной практике, в частности — в интересах физики элементарных частиц [6].

## 1.2. Преимущества криогенных детекторов

Повсеместно обрели популярность сверхпроводящие электромагнитные системы. Кроме экономии электрической энергии, они позволяют получать более сильные магнитные поля, будучи при этом компактными. Компактность востребована при проектировании магнитов детекторов с малой радиационной толщиной — для снижения радиационных потерь частиц в веществе магнитов на пути следования к системам регистрации. Сверхпроводящие магниты внедряются и в структуру коллайдеров. Наряду с низкотемпературными, активно используются высокотемпературные сверхпроводники. На их основе изготавливают так называемые токовводы — элементы сопряжения тёплых силовых выводов источников тока и холодных сверхпроводящих выводов (шинопроводов) сверхпроводящих электромагнитов. Токовводы обеспечивают на коротком участке электрической цепи переход с минимальным теплопритоком из окружающей среды в область низких температур.

Криогенные жидкости используются не только в роли хладагентов (как жидкий гелий — для термостатирования низкотемпературных сверхпроводников, жидкий азот — для термостатирования теплозащитных вакуумных экранов), но и в качестве рабочего вещества компонент исследовательских установок. Так, сжиженные при криогенных температурах благородные газы позволяют создавать электромагнитные калориметры (жидкостные ионизационные детекторы) с высоким пространственным разрешением. Благодаря высокой гранулярности регистрирующей структуры, заполняемой сжиженным благородным газом в роли радиационного поглотителя, удаётся определять точку конверсии нейтральных частиц (фотонов) с лучшей точностью, чем в кристаллических сцинтилляционных калориметрах, при сопоставимом энергетическом разрешении.

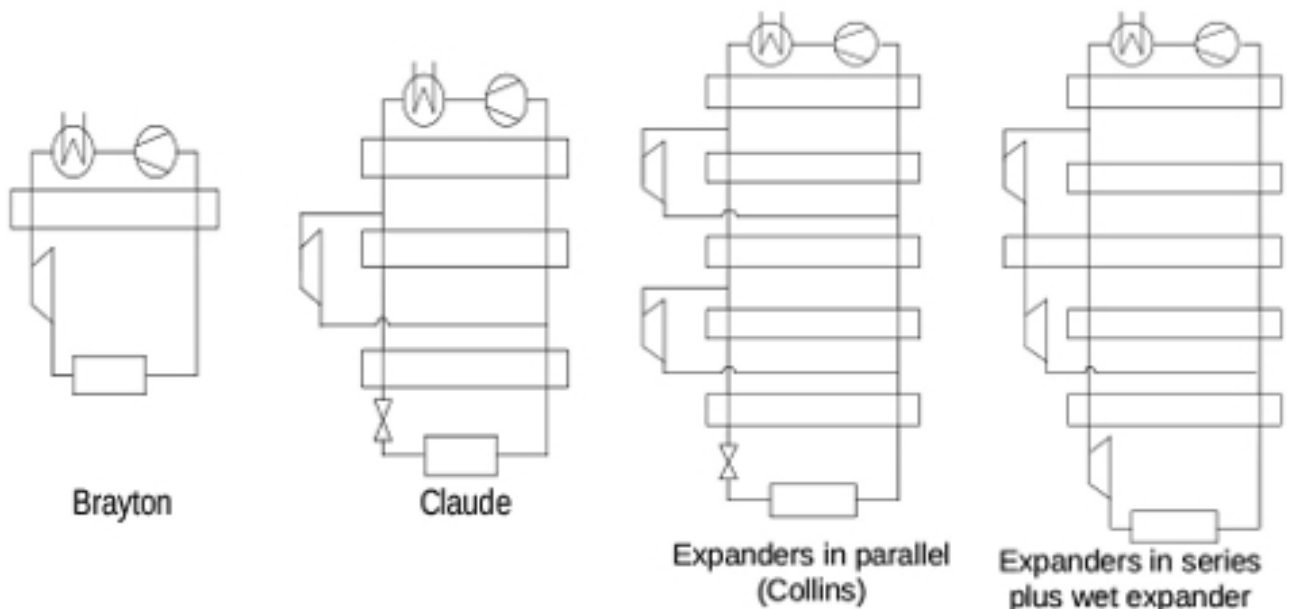
### 1.3. Криогенная система как объект управления

Различные криогенные устройства, при всём их многообразии и различии, объединяет одинаковая потребность в специализированном управлении технологическими режимами работы. Управление криосодержащими объектами базируется на общих принципах обращения с веществами при криогенных температурах и схожих конструктивных особенностях оборудования криогенных систем.

Последние неразрывно связаны со специфическими свойствами криопродукта: низкой температурой и малой величиной теплоты фазовых переходов, — провоцирующими непрерывное изменение его параметров и фазовые превращения. Ему присуща малая вязкость, зависимость физических свойств от температуры и существенное их различие между различными криогенными жидкостями. Хранение криопродукта (в резервуарах) сопровождается температурным расслоением — стратификацией, а транспортирование по трубопроводу подвергает его прогреву под воздействием внешнего теплопритока, падения давления и диссипативных потерь. Поэтому для протяжённого криогенного оборудования актуальна задача оптимизации скорости потока криогенной жидкости. На переходных режимах работы особое значение имеют неустановившиеся процессы - их отличает многообразие форм и высокоинтенсивные динамические нагрузки. При повышении давления разрушительную опасность представляют гидроудары, которые приводят к схлопыванию образующихся в застойных зонах криогенного оборудования паровых полостей - величина вторичного гидроудара может более чем на порядок превосходить величину первичного и обычно составляет несколько сотен атмосфер. Большие величины динамических нагрузок характерны для периода отработки криогенных процессов, особенно при их комбинации. Нагрузки приводят к пластической

деформации конструктивных элементов, а зачастую и к разрушению. Периодические разрушения элементов криогенного оборудования вероятны также в связи с его малоцикловой усталостью: дефекты могут проявляться и при однократном нагружении. Многие из перечисленных [31] выше особенностей специфичны для крупных криогенных систем.

В управлении криосистемой важно учитывать характерные особенности и физические свойства криогенного продукта — объекта управления. Не менее важно представлять физические принципы и специфику функционирования заключающего его криогенного оборудования — среды управления.



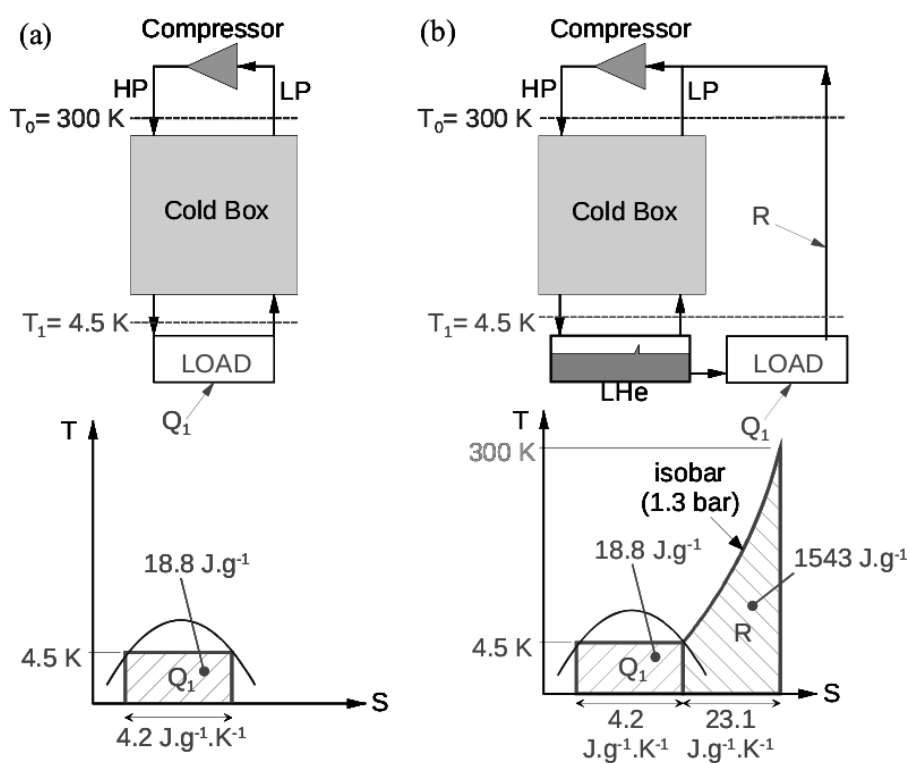
**Рисунок 1.3.1.** Схемы рефрижераторов с различными холодильными циклами: Брайтона, Клода, Коллинза и др. - с использованием теплообменников (обозначены прямоугольниками) и детандеров (обозначены трапециями)

К сложному лабораторному криогенному оборудованию следует отнести рефрижераторы. С их помощью могут быть легко получены температуры вплоть до 2 К [7]. Преимущество холодильного цикла (Рисунок 1.3.2) рефрижератора — в использовании энтальпии возвратного потока холодных

паров: из-за большой величины отношений энтальпий в точке кипения и при комнатной температуре хладагента к теплоте парообразования (для гелия  $\approx 70$ ), при испарении и нагреве паров до комнатной температуры поглощается во много раз (для гелия в  $\approx 70$  раз) больше теплоты, чем только при испарении, при этом расход жидкого хладагента (Таблица 1.3.1) значительно уменьшается (для гелия в  $\approx 40$  раз).

**Таблица 1.3.1.** Объёмный [л] расход криоагента на охлаждение 1 кг железа

Способ применения криоагента	Латентный теплообмен	Латентный теплообмен и энтальпия пара
Жидкий гелий, от 290 К до 4,2 К	29,5	0,75
Жидкий гелий, от 77 К до 4,2 К	1,46	0,12
Жидкий азот, от 290 К до 77 К	0,45	0,29



**Рисунок 1.3.2.** Сравнение рефрижераторного (а) и ожижительного (б) циклов для гелия



Объём жидкого хладагента (с плотностью  $\rho_{ж}$ ), требуемого для охлаждения криостатируемого объекта (массой  $m$ , с удельной теплоёмкостью материала  $C(T)$ ) с температуры  $T_1$  до температуры  $T_2$  за счёт испарения (поглощения теплоты парообразования  $r$ ) и холода паров (нагрева газа до конечной температуры  $T_2$  с плотностью  $\rho_{г}$ ), можно приближённо оценить по следующей формуле:

$$V_{жс} = \frac{\int_{4,2}^{300} C(T)mdT}{r + \frac{\rho_{жс}}{\rho_{г}}(i_{300} - i_{4,2})}$$

где  $\Delta i = i_{(T_1=300)} - i_{(T_2=4,2)}$  – разность энтальпий единицы объёма газообразного гелия при  $T_1 = 300$  К и  $T_2 = 4,2$  К.

Если криостатируемый объект (криостат) предварительно охлаждается жидким азотом, верхний предел интегрирования по теплоёмкости будет 77,3 К, а разность энтальпий будет браться от 77,3 К до 4,2 К:  $\Delta i = i_{77,3} - i_{4,2}$ . Так как теплоёмкость твердых тел в этом диапазоне температур зависит от температуры почти кубично  $C(T) \sim T^3$ , то количество жидкого гелия, необходимого для заливки криостата, сокращается примерно в 20 раз [8].

**Таблица 1.3.2.** Свойства гелия и азота в сравнении с водой

Свойство	Гелий	Азот	Вода
Точка кипения, нормальная [К]	4,2	77	373
Критическая температура [К]	5,2	126	647
Критическое давление [бар]	2,3	34	221
*Плотность жидкости [кг/м <sup>3</sup> ]	125	808	960
*Отношение плотностей жидкость/пар	7,4	175	1600
*Теплота испарения [кДж/кг]	20,4	199	2260
*Вязкость жидкости [мкПа·с]	3,3	152	278

\*в точке кипения при нормальных условиях

Рекуперация холода возвратного потока в рефрижераторе осуществляется в каскаде теплообменников (Рисунок 1.3.1). Наряду с энтальпией паров, существенными термодинамическими характеристиками для конденсируемых в рефрижераторах газов являются температура кипения и теплота фазового перехода (Таблица 1.3.2).

**Таблица 1.3.3.** Температура инверсии популярных криоагентов

Криоагент	Максимальная температура инверсии [К]
Гелий	43
Водород	202
Неон	260
Воздух	603
Азот	623
Кислород	761

Для охлаждения газа в рефрижераторах используют и эффект Джоуля-Томпсона [9]: изотермическое сжатие с последующим расширением при температуре, не выше инверсной ( $T_{и}$ ) для данного газа (Таблица 1.3.3). Если температура дросселируемого газа выше  $T_{и}$ , он будет нагреваться. Например, для гелия  $T_{и}=43$  К. Для газа Ван-дер-Ваальса инверсная температура связана с критической температурой ( $T_{кр}$ ) условием:  $T_{и} = 6,75 \cdot T_{кр}$ .

Применение детандеров, в которых сжатый рабочий газ охлаждается за счёт совершения работы, существенно повышает холодопроизводительность рефрижераторов (Рисунок 1.3.1). Для криогенных установок, предусматривающих работу в ожижительном и рефрижераторном режимах, системы управления должны обеспечивать переключение между ними (Рисунок 1.3.2).

Однако, простейшим и наименее дорогим путём достижения криогенных температур остаётся использование хладагентов — криогенных жидкостей [3]

(Таблица 1.3.4). Несмотря на их большое разнообразие, в научной практике в основном применяются жидкий гелий и жидкий азот, как наиболее безопасные.

**Таблица 1.3.4.** Температуры кипения жидких хладагентов при нормальном давлении и получаемый с их помощью температурный диапазон

Жидкий хладагент	Гелий $^4\text{He}$	Водород $\text{H}_2$	Неон $\text{Ne}$	Азот $\text{N}_2$	Аргон $\text{Ar}$	Кислород $\text{O}_2$
Температура кипения, К	4,224	20,28	27,108	77,36	87,29	90,188
Диапазон применения, К	1,0 - 4,2	20,4 - 14	24,5 - 27	63 - 78	75 - 88	55 - 90

Хладагенты позволяют обслуживать замкнутые криогенные системы с бездренажным циклом рабочих криогенных жидкостей (без сброса криопродукта в атмосферу). Как известно, за счёт естественного теплопритока из окружающей среды в криогенную систему криогенная жидкость при нормальном давлении кипит (Таблица 1.3.5). Скопление паров вызывает рост давления в замкнутой системе. Конденсация пара за счёт снятия тепла в теплообмене с хладагентом позволяет вернуть давление в системе в заданные пределы. (Следует заметить, что конденсация пара выгодно отличается от конденсации газа).

Вышесказанное поясняется известным соотношением для идеального газа:  $P \cdot V / T = \text{const}$ . При постоянном ( $\text{const}$ ) объёме ( $V$ ) замкнутой системы эта формула устанавливает прямопропорциональную связь давления ( $P$ ) и температуры ( $T$ ) газа:  $P / T = \text{const}$ .

Одним из требований, предъявляемым к криогенным системам научных установок, является чистота вещества криоагента. Для фильтрации от примесей, осушки и низкотемпературной очистки газов применяются группы адсорберов. Управление ними сводится к поочерёднему переключению из режима работы в режим регенерации, а также регулированию температуры

адсорбента или регенерирующего газа (азота) в процессе регенерации.

**Таблица 1.3.5.** Парообразование криоагентов при теплопритоке 1 Вт

Криоагент	мг/с	л/ч, жидкость	л/мин, газ (норм. усл.)
Гелий	48	1,38	16,4
Азот	5	0,02	0,24

Технологические аппараты криогенных установок, как правило, работают в широком диапазоне температур рабочей среды (от 300 К до 4,2 К - в гелиевых рефрижераторах), в условиях малых значений разности температур потоков и гидравлических сопротивлений. Требования к регулированию технологических параметров определяются в зависимости от характера протекающих в них процессов [5].

Процессы могут быть как стационарными, так и нестационарными. Стационарные режимы характеризуются отсутствием возмущающих воздействий со стороны криостатируемых объектов. Нестационарные режимы характеризуются непостоянной тепловой нагрузкой, которая может носить регулярный импульсный характер, или пиковый, являющийся функцией работы энергосистем. К нестационарным режимам приводят и аварийные повышения тепловой нагрузки, например, при переходе сверхпроводника в нормальную фазу. При управлении такими режимами коррекция должна производиться с учётом расхода обратного потока криоагента на выходе из системы и его температуры [5].

Криогенная система может работать как в режимах охлаждения или отогрева, так и в режиме криостатирования оборудования. Управление криостатированием должно быть организовано таким образом, чтобы обеспечить необходимые условия теплообмена между криоагентом и объектом для стабилизации его рабочей температуры при регулярных или случайных тепловых возмущениях. Управление процессами охлаждения или отогрева

должно обеспечить заданную скорость этих процессов, исключая появление больших термических напряжений и аварийных значений давления криоагента при его испарении в случае превышения расчётных значений тепловых нагрузок.

#### **1.4. Средства управления криогенным обеспечением**

Основные задачи, решаемые средствами управления криогенным обеспечением: измерение, контроль и целенаправленное изменение параметров технологических процессов.

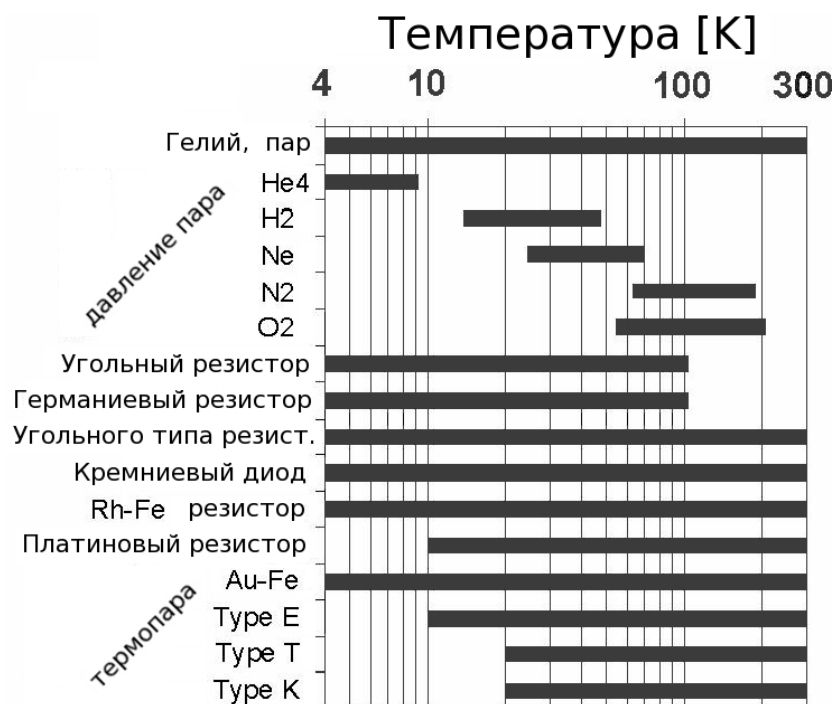
Обеспечение управления криогенными процессами возлагается прежде всего на средства, находящиеся в непосредственном контакте с объектом управления, или криопродуктом. Это криогенные исполнительные устройства и первичные преобразователи (сенсоры, или датчики) физических величин в электрические, измеряемые с помощью электроники и ЭВМ.

Качество работы криогенной установки во многом зависит от достаточного объёма надёжной и точной информации о параметрах криопродукта, достоверность которой часто принципиально важна для управления криогенными процессами.

С помощью первичных преобразователей контролируются параметры криогенного оборудования: расход, давление, перепад давления, пульсации давления, остаточное давление (вакуум), уровень, температура, частота вращения и другие.

Наибольший объём (до 70 %) производимого контроля при эксплуатации криогенного оборудования приходится на долю температурных измерений [5]. Необходима информация о температуре (Рисунок 1.3.5) как в широком диапазоне, например, при захлаживании или отогреве оборудования, так и в узком диапазоне вблизи рабочей точки, например, при термостатировании

объекта. Датчики температуры могут иметь специализированное исполнение для измерения в различных условиях: стационарных (в криостатах), динамичных (в трубопроводах), прочих.



**Рисунок 1.3.5.** Рабочие диапазоны температур криоагентов и измерителей температуры

Расход криопродуктов — один из основных контролируемых технологических параметров, характеризующих производительность криогенных установок и систем.

Контроль уровня криогенных жидкостей необходим для обеспечения правильности проведения технологических процессов в криогенных установках, точности и надёжности регулирования при приёме, отпуске и хранении жидких криопродуктов.

Контроль давления, перепадов и пульсаций давления необходим особенно на этапе отработки технологических процессов, а также для контроля за динамикой переходных процессов при перестройке режимов

работы криогенного оборудования. Контроль остаточного давления (вакуума) важен [10] для поддержания высокого вакуума в теплозащитных полостях криогенных сосудов и трубопроводов. От качества вакуума зависит эффективность экранно-вакуумной теплоизоляции, находящейся в этих полостях.

В роли исполнительных устройств, встраиваемых в криогенное оборудование, обычно выступают клапаны различных типов: электромеханические, электромагнитные, пневматические, комбинированные и другие. Их можно подразделить на два класса: двухпозиционные и регулирующие. Общей чертой исполнительных устройств является наличие электрического привода, что позволяет обеспечить дистанционное управление ими, в том числе посредством ЭВМ.

Управление криогенной системой является задачей реального времени. Применительно к вычислительной системе и криогенным объектам (оборудованию и процессам) это означает управление ими, получение информации, её обработка и возвращение результатов достаточно быстро для того, чтобы воздействовать на функционирование объектов в почти тот же момент времени [11]. Для этого требуется наделение оператора-технолога средствами контроля и коррекции реальной динамики технологических процессов. Предоставляемые средства должны быть быстродействующими и малоинерционными. Минимизация инерционности средств управления и контроля строится на автоматизации технологических процессов на основе внедрения микропроцессорной электроники и вычислительной техники.

К началу проектирования системы криогенного обеспечения детектора КЕДР [12], 1987 году, тенденция автоматизации в управлении криогенными комплексами подкреплялась заметным прогрессом в электронике. Наиболее проработанными из появляющихся частных решений задачи автоматизации были функции контроля. В меньшей степени это относилось к функциям

управления. Отмеченный период характеризуется широким внедрением систем автоматизации экспериментов в ИЯФ СО РАН с использованием ЭВМ, микропроцессорных контроллеров и сопряжённой с ними электроники — собственного производства [ [13], [14], [15] ].

В то время получило популярность использование электронных блоков магистрально-модульной компоновки, с общей шиной данных/управления и арбитражным контроллером, подчинённым ЭВМ. Их преимущество — в простоте передачи данных между отдельными модулями, подключёнными к магистрали, гибкости при изменении конфигурации системы, унификации программного управления, возможности создания систем любой сложности. К такой архитектуре относится стандарт КАМАК, активно применяемый в лабораториях физики высоких энергий. Единый конструктив — так называемый крейт, 24-разрядная шина раздельного (чтения, записи, управления) информационного обмена и общий мощный источник питания связывают группу модулей, стыкуемых к магистральной шине в любом из 25 посадочных мест. (Последние две позиции крейта обычно занимает контроллер).

Под конструктив КАМАК в ИЯФ СО РАН разработана большая номенклатура (более сотни видов) разнообразных модулей электроники, в том числе для автоматизации электрофизических установок. Заметным достижением стало создание и серийный выпуск в стандарте КАМАК оперативно программируемого микропроцессорного 24-разрядного КАМАК-контроллера ОДРЁНОК [13]. Возможность добавления к нему в группу служебных модулей (памяти, интерфейсов и других) превращала его в микро-ЭВМ с расширяемой функциональностью. Появление такой КАМАК-ЭВМ позволило строить на её основе автономные интеллектуальные модульные системы управления различными электрофизическими установками и экспериментальными стендами.



Основными устройствами ввода и отображения информации служили терминалы с алфавитно-цифровыми дисплеями, подключаемыми к ЭВМ по протоколу V.24 низкоскоростной (порядка 9600 бод) последовательной связи, а также растровые графические мониторы с невысоким разрешением (256 точек × 256 точек) и узкой цветовой палитрой (7 битов на точку).

В то время, как сопровождение криогенных комплексов в нашей стране ориентировалось на использование мини-ЭВМ (типа ЭЛЕКТРОНИКА-60), за рубежом начали внедряться программируемые микропроцессорные контроллеры, встраиваемые в криогенное оборудование. Они предназначались для автономной работы, либо связывались с персональными ЭВМ по встроенному и аппаратно поддерживаемому протоколу информационного обмена. Дисплеи их ЭВМ отличались высоким разрешением (благодаря графическим адаптерам EGA, VGA, затем - более совершенными), расширенной цветовой палитрой (16 битов на точку и более), более развитыми были и инструменты программирования.

Неотъемлемым компонентом вычислительных средств управления является программный продукт, управляющий работой всей вычислительной системы.

Экспериментальные установки физических лабораторий являются, как правило, уникальными изделиями. Так же уникальны масштабы и структура их криогенных компонент и оборудования систем криогенного обеспечения. Поэтому разработка унифицированного программного продукта для управления криогенной системой представляется довольно трудоёмкой задачей. К тому же, прогресс не стоит на месте, и для новых криогенных систем предпочтительнее использовать новое обеспечение, вбирающие в себя самые передовые технологии. Если ещё учесть фактор быстрого морального устаревания технологий (для вычислительной техники период реновации — от трёх до пяти лет), то выбор в пользу специализированных разработок

очевиден. Вместе с тем, у любого нового продукта отсутствует весомое преимущество — проверка временем, которым обладают хорошо зарекомендовавшие себя системы предыдущего поколения. В любом случае, для стороннего специализированного или унифицированного продукта необходима адаптация к требованиям конкретной установки и особенностям её оборудования. Кроме того, спецификой лабораторных комплексов является изменчивость их инфраструктуры, отвечающей развитию задач эксперимента. Соответственно, интеллектуальный продукт требует оперативного сопровождения, поддерживающего его функциональную масштабируемость. В этом аспекте собственная разработка имеет важное преимущество — она изначально адаптируется под инфраструктуру и требования конкретной системы.

Оценка обобщённого опыта [ [16], [5] ] сопровождения криогенного обеспечения экспериментов, предшествовавших появлению данной работы, позволило сделать вывод о наличии (в ИЯФ СО РАН) собственных передовых вычислительных технологий, электроники и производственных ресурсов для самостоятельной разработки средств криогенного управления детектора КЕДР. Это было отражено в планах [12] при проектировании систем детектора, а позднее подтверждено практически. Положительный итог работы послужил предметом рассмотрения накопленного опыта в представленной диссертации.

## Глава 2. Детектор КЕДР для экспериментов на ВЭПП-4М

Методика встречных пучков получила всеобщее признание в мире и стала одной из основных в физике высоких энергий [17]. Имея приоритет в становлении этой методики (ускоритель ВЭП-1,  $2 \times 160$  МэВ, 1964 год), ИЯФ СО РАН продолжает её развитие [18]. Результатом являются создаваемые и работающие уникальные исследовательские установки, состоящие из ускорительных комплексов и разработанных для них детекторов.



**Рисунок 2.1.** Схема ускорительного комплекса ВЭПП-4М с детектором КЕДР

Универсальный детектор КЕДР [ [19], [20] ] создавался (с 1987 года по 2002 год) для изучения столкновений встречных электронного и позитронного

пучков с энергией в системе центра инерции от 1,8 до 11 ГэВ на ускорителе ВЭПП-4М [ [21], [22] ].

### 2.1. Ускорительный комплекс ВЭПП-4М

Коллайдер ВЭПП-4М входит (Рисунок 2.1) в состав [ [21], [22] ] уникального электрон-позитронного ускорительного комплекса: ЭЛИТ-3А (3 МэВ), линейный ускоритель ЛИНАК (50 МэВ), электрон-позитронный конвертор, синхротрон Б-4 (350 МэВ), ускоритель-накопитель ВЭПП-3 (2 ГэВ, периметр — 74,4 м) и коллайдер ВЭПП-4М (11 ГэВ, периметр — 366,075 м).

Пучки (сгустки) электронов и позитронов ускоряются одновременно в общей вакуумной камере. Рабочая мода ускорения пучков:  $2e^- \times 2e^+$ .

Эффективность столкновений оценивается светимостью  $L$ : на энергии 1,5 ГэВ  $L=10^{30} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ; на энергии 5 ГэВ  $L=8\cdot 10^{31} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ .

Ускорительный комплекс используется также в качестве источников синхротронного излучения; для эксперимента ДЕЙТРОН по упругому рассеянию электрона и позитрона на протоне; для прикладных экспериментов на выведенном электронном пучке.

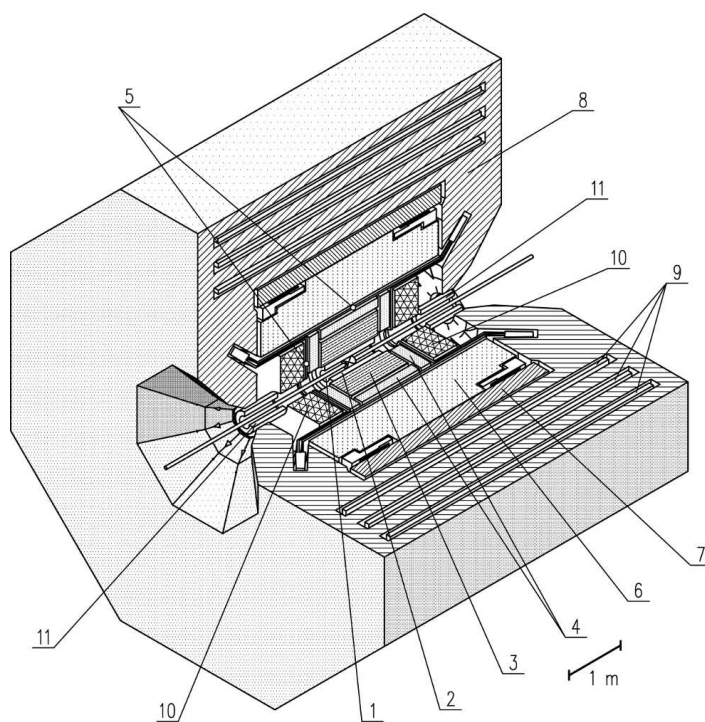
Благодаря регулярной калибровке энергии ( $E$ ) ВЭПП-4М методом резонансной деполяризации (с точностью интерполяции между калибровками  $\Delta E \sim 20 \text{ кэВ}$ ;  $\Delta E/E \sim 10^{-6}$ ) и методом мониторинга спектра комптоновского рассеяния (с точностью  $\Delta E \sim 70 \text{ кэВ}$ ;  $\Delta E/E \sim 3\cdot 10^{-5}$ ), удаётся существенно повысить точность экспериментов [ [23], [24] ].

### 2.2. Универсальный детектор КЕДР

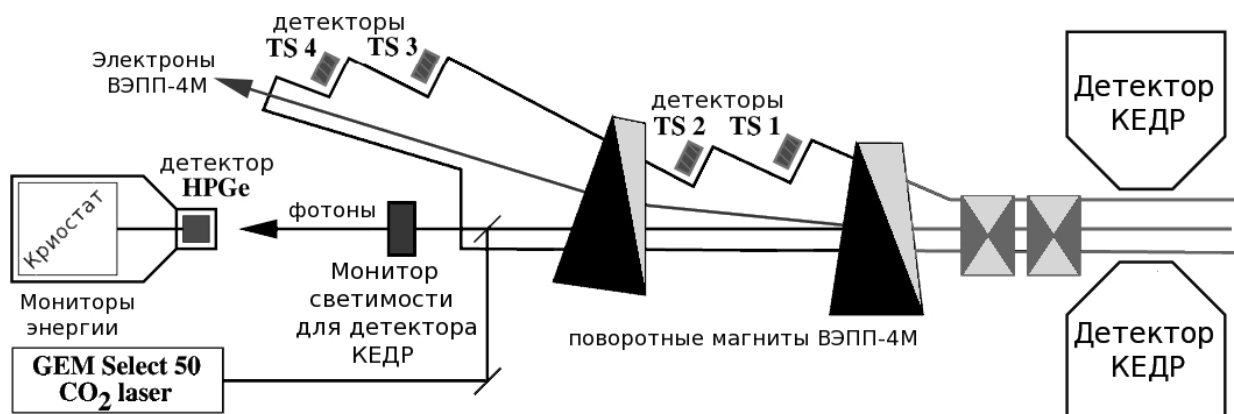
Детектор КЕДР [ [20], [25],[26] ] располагается (Рисунок 2.1)

симметрично относительно места встречи (столкновения) пучков на одном из двух линейных участков кольца ВЭПП-4М.

Внутри ярма магнитов находятся (Рисунок 2.2) ключевые элементы: вершинный детектор, дрейфовая камера, аэрогелевые пороговые черенковские счётчики, времяпролётные счётчики, составной электромагнитный калориметр из центральной жидкокриптоновой секции и двух торцевых кристаллических (CsI) сцинтилляционных секций, сверхпроводящие (NbTi/Cu) центральный основной и торцевые компенсирующие соленоиды, мюонные камеры.



**Рисунок 2.2.** Детектор КЕДР: 1 - вакуумная труба ускорителя, 2 - вершинный детектор, 3 - дрейфовая камера, 4 - аэрогелевые пороговые счётчики, 5 - времяпролётные счётчики, 6 - жидкокриптоновый калориметр, 7 - основной сверхпроводящий соленоид, 8 - ярмо, 9 - мюонные камеры, 10 - кристаллический CsI калориметр, 11 - компенсирующие сверхпроводящие соленоиды.



**Рисунок 2.3.** Внешние системы детектора КЕДР (вид сверху): система регистрации рассеянных электронов (TS1 ÷ TS4), монитор светимости и мониторы энергии.

За пределами ярма располагаются (Рисунок 2.3) дополнительные устройства: система регистрации рассеянных электронов (спектрометр на поворотных магнитных линзах ускорителя с разрешением по инвариантной массе  $2\gamma$ -состояния  $\sim 10^{-2}$ ) [27], монитор светимости (электромагнитный сцинтилляционный калориметр) и мониторы энергии (лазерный и деполяризационный).

Физическая программа детектора КЕДР нацелена на прецизионные эксперименты в диапазоне энергий  $2E = 1,8 \div 11$  ГэВ. Её основные задачи:

- 1) измерение различных параметров, в том числе масс, элементарных частиц:
  - на низкой энергии:  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\psi(3770)$ ,  $D^0$ ,  $D^\pm$  -мезоны,  $\tau$  -лептон;
  - на высокой энергии:  $\Upsilon(1S)$ ,  $\Upsilon(2S)$ ,  $\Upsilon(3S)$ ,  $\Upsilon(4S)$  -мезоны;
- 2) измерение  $R = \sigma_{(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})} / \sigma_{(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$  - отношения сечений процессов - в диапазоне энергий  $2 \div 10$  ГэВ;
- 3) измерение двухфотонных ширин  $C$ -чётных резонансов; измерение полного сечения двухфотонного рождения адронов; исследование  $2\gamma$ -процессов.

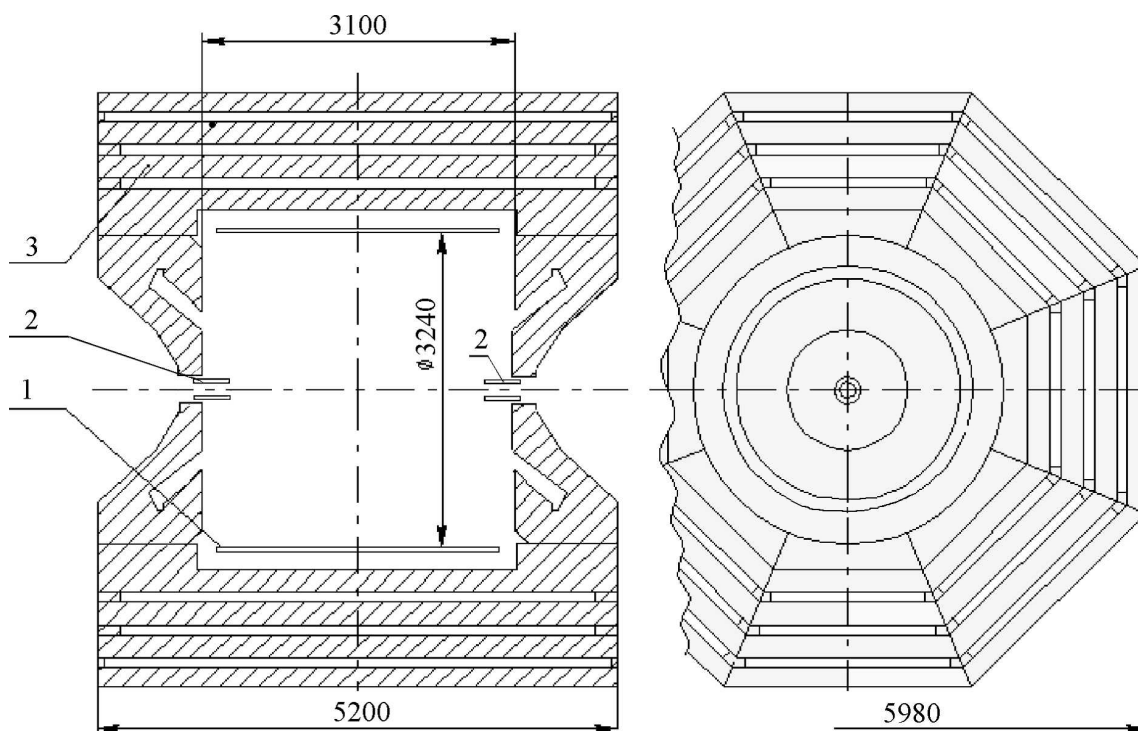
Отличительной особенностью детектора КЕДР является наличие сложных криогенных компонент: жидкокриптонового электромагнитного калориметра и трёх сверхпроводящих магнитов.

## Глава 3. Криогенные компоненты детектора КЕДР

### 3.1. Криогенные магниты

Для измерения импульсов заряженных частиц в области регистрирующей их координаты проволочной газовой дрейфовой камеры детектора необходимо постоянное однородное магнитное поле вдоль направления движения пучков. Причём, чем выше абсолютная величина магнитной индукции, тем выше результирующее импульсное разрешение.

Постоянное однородное продольное магнитное поле создаёт большой центральный сверхпроводящий соленоид.



**Рисунок 3.1.** Магнитная система детектора КЕДР: 1 - основной сверхпроводящий соленоид, 2 - компенсирующие сверхпроводящие соленоиды, 3 - ярмо.

Дестабилизирующее влияние индуцированного магнитного поля на фокусировку и параметры движения пучков на участке ускорения, занимаемом детектором, компенсируют два компактных сверхпроводящих соленоида, расположенные симметрично по оси симметрии детектора — на его торцах.

**Таблица 3.1.** Параметры сверхпроводящих соленоидов детектора КЕДР

Наименование параметра	Основной соленоид	Компенсирующий соленоид
Максимальное магнитное поле (проект), Тл	1,83	6,55 (5,6 - при максимальном поле в основном соленоиде)
Магнитное поле (рабочее), Тл	0,6	2,2
Рабочий ток (проект), кА	8	0,292
Отношение рабочего тока к критическому	0,56	0,45 ÷ 0,46
Запасённая энергия (проект), МДж	39	0,124
Количество слоёв витков катушки, штук	1 + 1 (обратные витки)	17
Количество витков, штук	560 + 8 (обратные)	7726
Индуктивность, Гн	1,22	2,9
Толщина намотки, мм	4,5	15,7
Длина намотки, м	2,84	0,433
Длина криостата, м	3,16	0,560
Наружный диаметр криостата, м	3,57	0,246
Внутренний диаметр криостата, м	3,12	0,120
Внутренний диаметр соленоида, м	3,24	0,146
Полная масса катушки с криостатом, кг	12000	90
Масса гелиевого сосуда с соленоидом, кг	5000	-
Вместимость гелиевого сосуда, л	300	-
Радиационная толщина катушки, $X_0$	0,95	-
Е/М (проект), МДж/кг	7,8	-
Индуктивность обратных витков, Гн	$0,28 \cdot 10^{-3}$	-
Сопротивление шунтирования витков, Ом	$6 \cdot 10^{-6}$	-

Магнитная система [[28], [29], [30]] (Рисунок 3.1) снабжена ярмом.



Массивное (~ 740 тонн) железное ярмо замыкает обратный поток магнитного поля и служит основной конструкционной опорой для прочих компонент детектора, а также радиационным поглотителем перед мюонными детектирующими камерами, находящимися в воздушных зазорах между слоями железа.

Основные конструкционные параметры [31] сверхпроводящих (NbTi/Cu) соленоидов и их криостатов (из нержавеющей стали) сведены в таблице 3.1.

### 3.1.1. Основной сверхпроводящий соленоид

Центральный СП соленоид [ [32], [33] ] предназначен для создания постоянного однородного магнитного поля 1,83 Тл (проектное значение) вдоль орбит ускоряемых пучков.

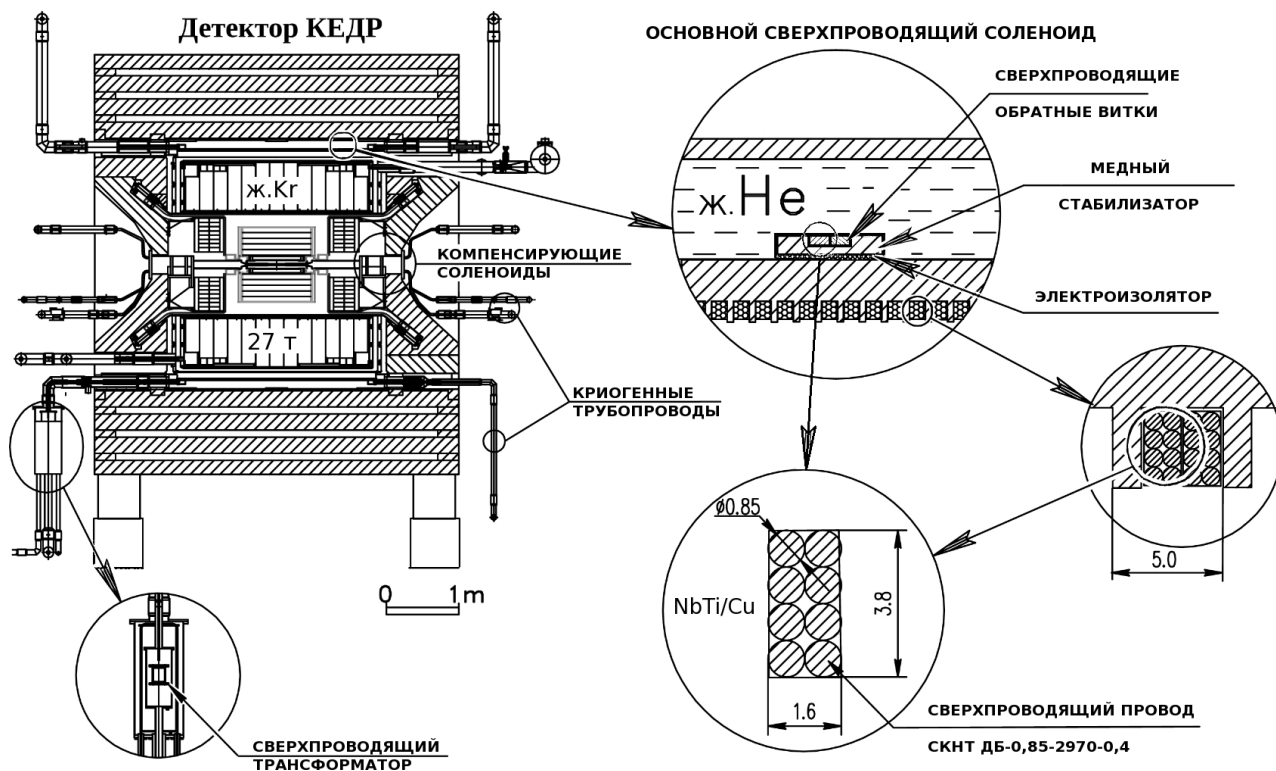


Рисунок 3.2. Сверхпроводящая катушка основного соленоида

Особенностью соленоида является метод защиты сверхпроводящих витков от разрушения при нарушении сверхпроводимости [34]. Суть метода заключается в распределении импульсно выделяющейся при нарушении сверхпроводимости энергии равномерно между всеми витками соленоида за счёт низкоомного шунтирующего равномерно распределённого вдоль каждого витка сопротивления. Оно обеспечивается помещением и впаиванием каждого витка катушки в спиральную канавку в стальной стенке кольцеобразного цилиндрического корпуса криостата. При этом корпус служит также механической опорой и наружным бандажом СП катушки.

В основном слое соленоида запаяно 560 витков. Дополнительный слой из восьми нешунтированных витков обеспечивает возврат сверхпроводника в начальную точку намотки — для подключения к магистрали электропитания.

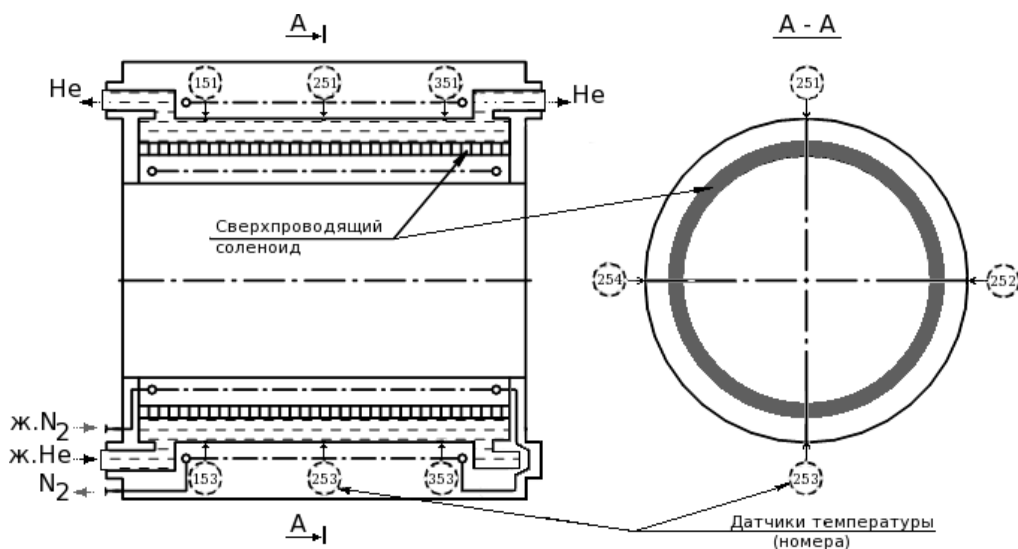
Двуслойная катушка соленоида (Рисунок 3.2) изготовлена из сдвоенной СП шины (марки СТП-8-0,85) размером 1,6 мм × 3,8 мм каждая. Шина прямоугольного сечения содержит восемь (2×4) свитых проводов диаметром 0,85 мм из 2970 жил сверхпроводящего ниобий-титанового сплава (марки СКНТ ДБ-0,85-2970-0,4) в медной матрице (NbTi/Cu) с коэффициентом заполнения 0,4.

Кабель из сдвоенной СП шины уложен в канавку прямоугольного сечения 3,5 мм × 4,5 мм, выточенную по спирали с шагом 5 мм на внутренней поверхности внутренней стенки кольцеобразного цилиндрического гелиевого сосуда, и пропаян оловосодержащим припоем марки ПОС-61. Восемь обратных витков впаяны в медную термостабилизирующую шину сечением 4 мм × 24 мм. Она через электроизолирующую прокладку из стеклотекстолитовой ленты закреплена хомутами поверх стальной поверхности первого слоя катушки, внутри гелиевого сосуда криостата магнита.

Для охлаждения катушки до сверхпроводящего состояния гелиевый

сосуд заполняется 300 л жидкого гелия с температурой 4,2 К при нормальном давлении. Тепловой контакт основного (впяного) слоя СП катушки с хладагентом (жидким гелием) осуществляется через стенку толщиной 10 мм — за счёт теплопроводности, а слоя обратных витков — непосредственным контактом с жидким гелием. Отличие по температуре сверхпроводника от жидкого криогенного хладагента — менее 0,1 К. Во время нарушения сверхпроводимости расчётный нагрев соленоида не превышает 70° С.

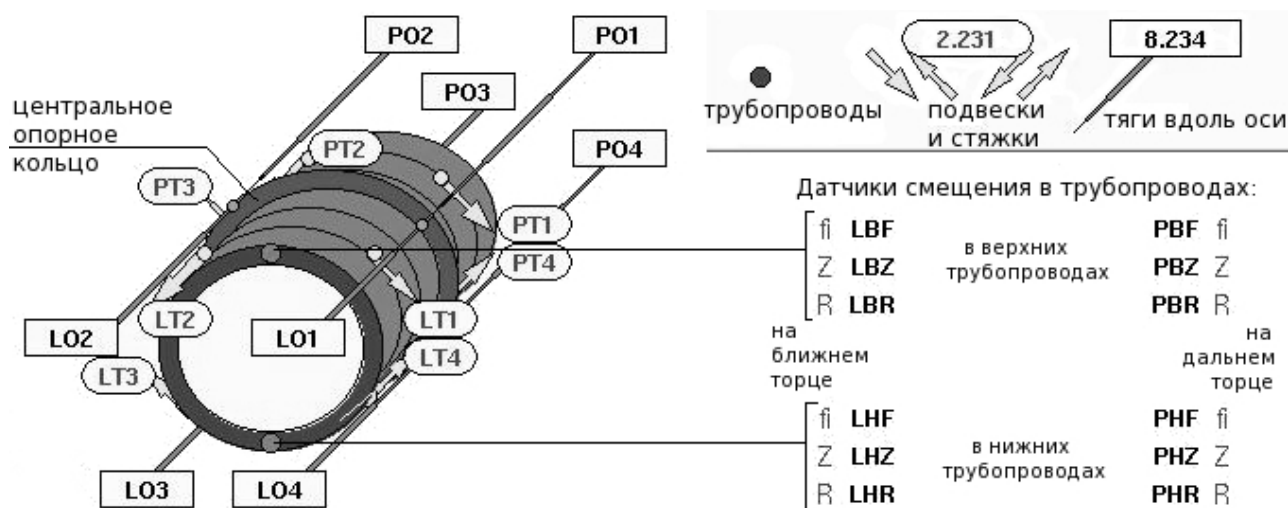
Холодный (гелиевый) сосуд изготовлен из коаксиальных цилиндрических колец: внутреннего — толщиной 14 мм (внутри которого впаян соленоид), и внешнего — толщиной 4 мм, сваренных по краям с плоскими кольцеобразными боковыми стенками. Тёплый корпус криостата имеет внешнюю кольцеобразную стенку толщиной 12 мм, сваренную из двух цилиндрических половинок и трёх соединительных колец толщиной 25 мм — в середине и по краям. На кольца снаружи приварены выступы для использования в качестве опор при установке в ядро. Внутренняя стенка тёплого корпуса имеет толщину 6 мм.



**Рисунок 3.3.** Гелиевый криостат основного соленоида (справа — без тёплого корпуса). Цифрами обозначено расположение встроенных датчиков температуры, пунктиром — азотный экран.

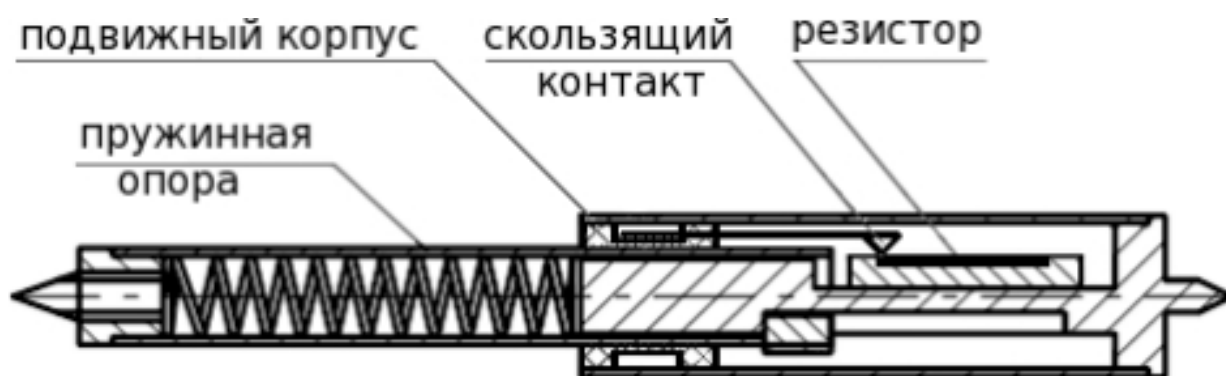
Поверх гелиевого сосуда (Рисунок 3.3) уложено  $5 \times 15$  слоёв экранно-вакуумной теплоизоляции с дополнительным азотным экраном внутри — в виде зигзагообразно изогнутой (шаг 290 мм) вокруг гелиевого сосуда медной трубки  $10 \times 1$  мм, укрытой алюминиевой фольгой. Экран обеспечивает снижение подвода тепла к жидкому гелию из окружающей среды более чем в 100 раз [22].

На холодный сосуд соленоида приварены три опорных стальных кольца (рёбра жёсткости) — по центру и по торцам. Холодный сосуд (с катушкой СП магнита) подвешен (Рисунок 3.4) внутри тёплого корпуса при помощи цилиндрических стержней — тяг, расположенных как в поперечной, так и в продольной оси магнита плоскостях. Тяги имеют теплоизоляторы для минимизации теплопритока от тёплого корпуса к холодному. В местах крепления всех тяг на тёплом корпусе криостата имеются регулировочные гайки, обеспечивающие нужное натяжение и юстировку магнита относительно тёплого корпуса при сборке криостата.



**Рисунок 3.4.** Мнемосхема. Подвеска основного соленоида в криостате (условно). Наружный корпус не показан. Показана кодировка установленных на концах тяг датчиков перемещения.

Для контроля равной степени натяжения тяг, на их прокалиброванных на нагрузочном стенде пружинных блоках (специально подобранных наборах тарельчатых пружин) установлены специально разработанные резистивные датчики (Рисунок 3.5) линейных перемещений (с точностью 0,1 мм) телескопической конструкции ДП-10, ДП-16 (цифра обозначает максимальный рабочий ход датчика, мм). Таким образом, зная коэффициент жёсткости, или модуль Юнга, ( $K$ ) и величину линейной деформации ( $X$ ) тяги с пружинным блоком, можно оценить индивидуальную нагрузку ( $F$ ) на эту конструкцию по формуле:  $|F| = |K \cdot X|$ .

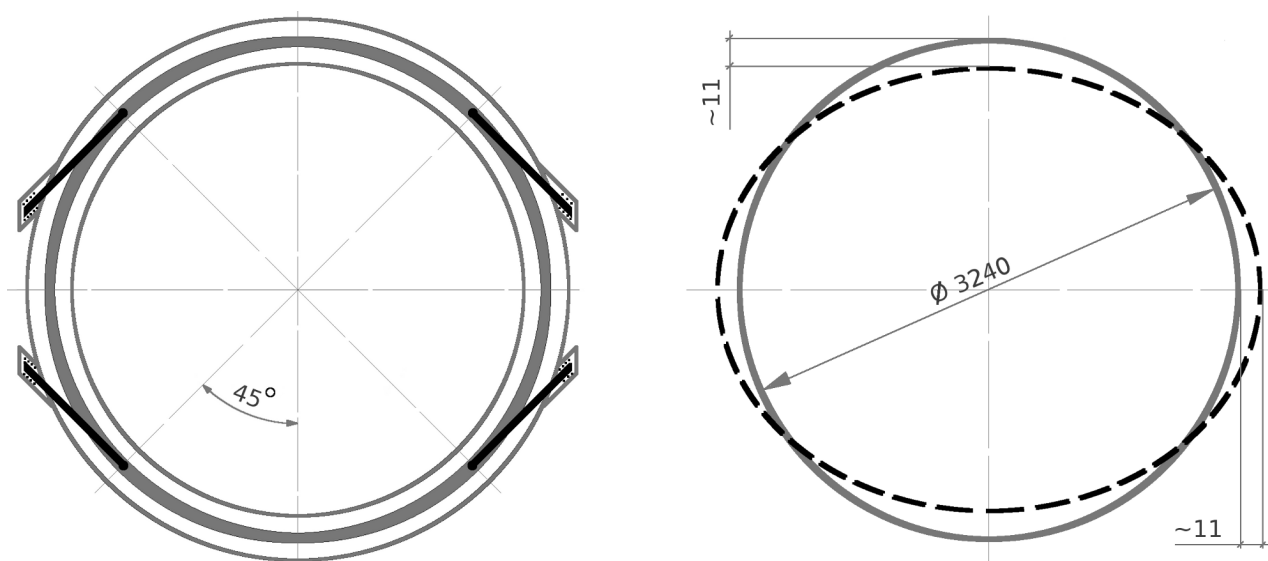


**Рисунок 3.5.** Датчик перемещения типа ДП-10 (ДП-16)

Поперечные тяги располагаются (Рисунок 3.6) в плоскостях торцевых поверхностей холодного сосуда и крепятся к ним снизу («подвески») и сверху («стяжки») — в точках, находящихся под углом 45 градусов к вертикальной оси. Противоположные концы тяг подпружинены и закреплены на цилиндрической поверхности тёплого корпуса (Рисунок 3.7).

От перемещений по горизонтали в осевом направлении холодный сосуд (СП магнит) предохраняют восемь тяг («растяжки»), закреплённых (Рисунок 3.4) зеркально симметрично относительно его центрального опорного кольца в четырёх точках, под углом 60 градусов к вертикальной оси — сверху и снизу.

Со стороны тёплого корпуса (Рисунок 3.7) тяги подпружинены.

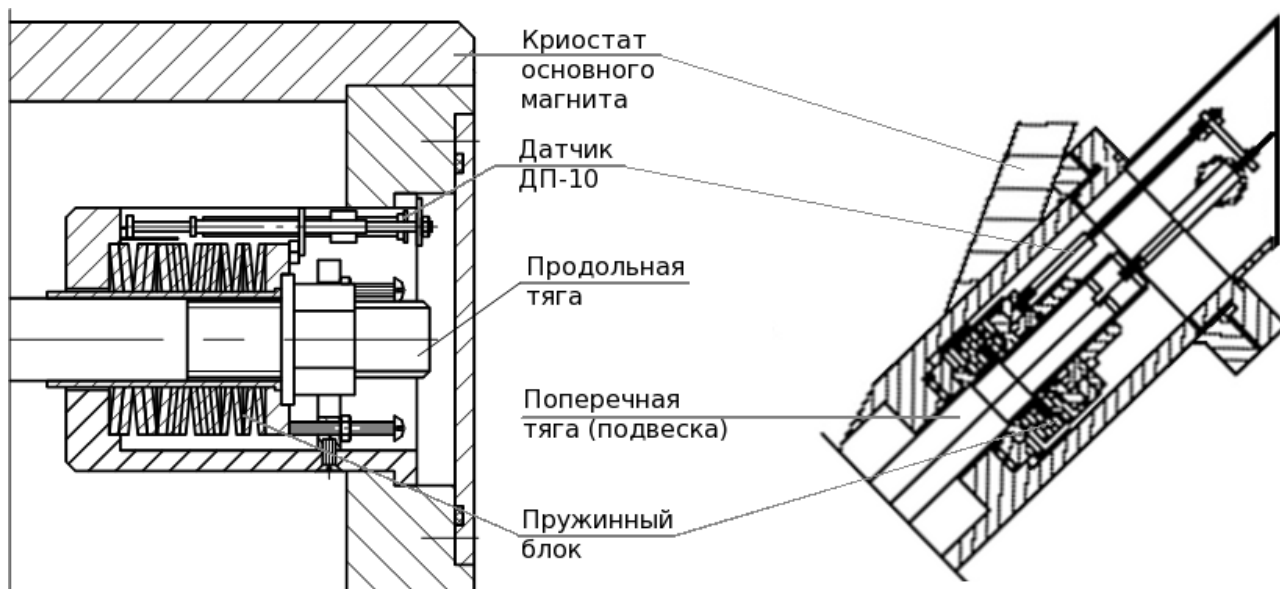


**Рисунок 3.6.** Схема крепления поперечных тяг: «подвесок» (внизу) и «стяжек» (вверху). Показано зафиксированное отклонение (в миллиметрах) формы криостата от окружности под действием силы тяжести без магнитного поля.

Пружинный блок продольных растяжек содержит набор (Рисунок 3.7) из 16 тарельчатых пружин (далее на схеме конфигурации каждая тарельчатая пружина обозначена символом скобки соответствующего вида изгиба) с ходом 5 мм, собранных в конфигурации по схеме: )()()))(((O))(( — для компенсации температурных усадок гелиевого сосуда криостата при захолаживании и подвижек СП катушки относительно корпуса при подъёме магнитного поля.

Пружинный блок подвесок содержит шесть тарельчатых пружин в конфигурации: (((O)). На стяжках установлены пружины из проволоки — ввиду большего рабочего хода и меньших действующих нагрузок.

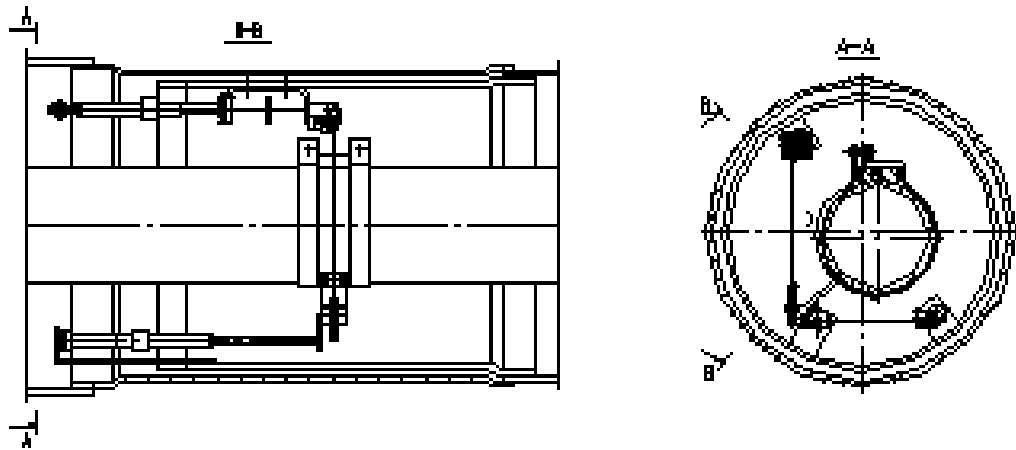
Максимальный ход подпружиненных тяг подвесок  $X_{\max}=3$  мм,  $K=1270$  кг/мм. Для продольных растяжек:  $X_{\max}=5$  мм,  $K=358$  кг/мм. Для проволочных пружин стяжек:  $X_{\max}=17$  мм,  $K=28$  кг/мм.



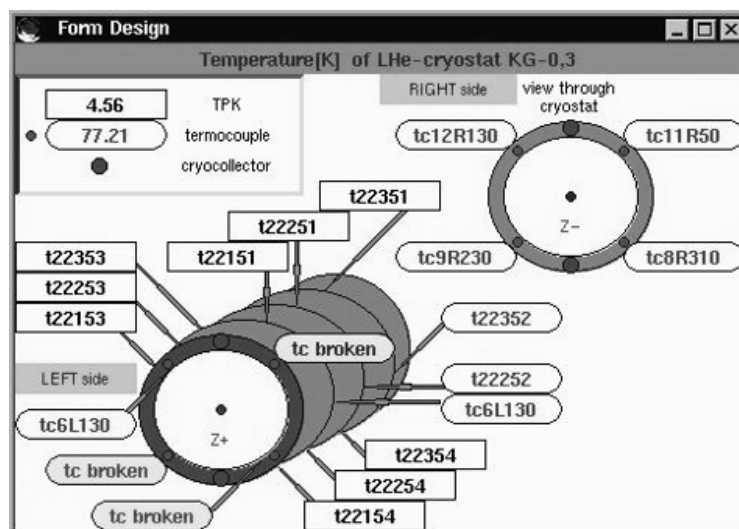
**Рисунок 3.7.** Пружинные блоки (разный масштаб) продольных (слева) и поперечных (справа) тяг с датчиками перемещения ДП-10

По три телескопических резистивных датчика перемещений (Рисунок 3.5) установлены в вакуумной теплоизолирующей полости (в зазоре между холодной и тёплой трубой) четырёх криогенных трубопроводов, по которым осуществляются подвод жидкого гелия в криостат (два — снизу) и эвакуация его паров (два — сверху). Датчики контролируют перемещение внутренней трубы (магнита) относительно внешней (корпуса криостата) в трёх ортогональных направлениях.

При установке в межтрубных зазорах (Рисунок 3.8), датчики располагаются на тёплом корпусе параллельно осям труб, а их привод осуществляется посредством закреплённой на холодной трубе тонкой стекловолоконной нити, намотанной на поворотный блок шкивов с заданным передаточным числом.



**Рисунок 3.8.** Расположение датчиков перемещений в трубах криостата основного магнита



**Рисунок 3.9.** Мнемосхема. Датчики температуры на корпусе гелиевого сосуда основного магнита: tc - термопары медь-константан, t - полупроводниковые ТПК-720А.

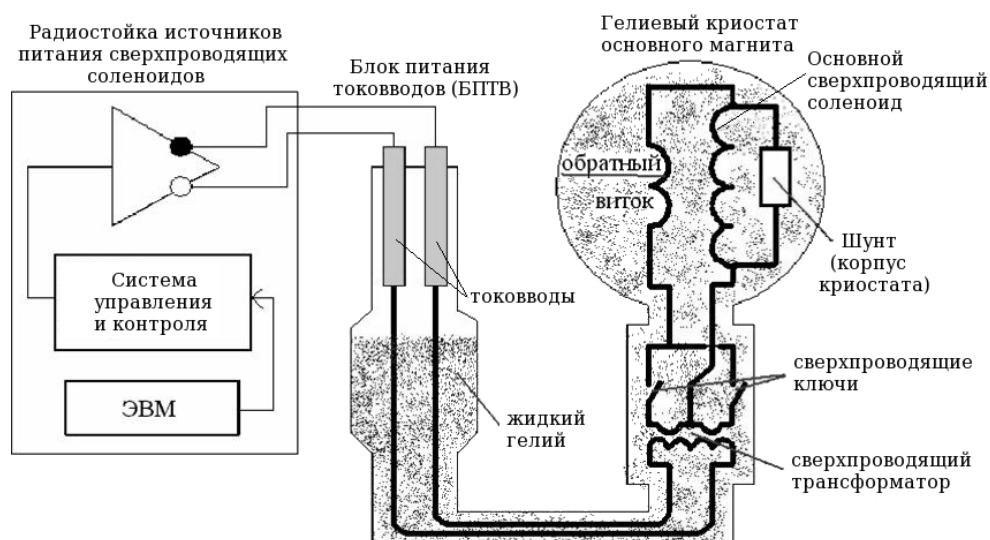
В вакуумном объёме, на поверхности гелиевого сосуда (рисунки 3.3 и 3.9), установлены 12 полупроводниковых датчиков ТПК-720А с диапазоном измерения температуры  $3,5 \div 20$  К и точностью 0,08 К. Для контроля процесса захлаживания гелиевого криостата были добавлены (Рисунок 3.9) восемь



термопар медь-константан дифференциального типа: один спай крепится на холодном корпусе криостата, другой — на тёплом.

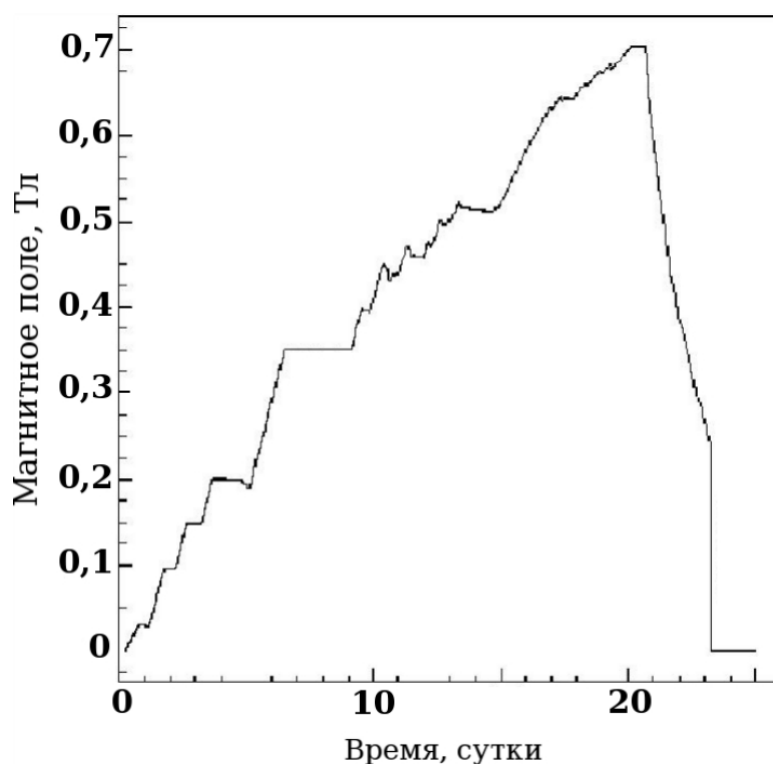
Требуемый вакуум в теплоизоляционной полости — лучше  $10^{-4}$  Па. Рабочие значения вакуума —  $2 \cdot 10^{-3}$  Па (наблюдается его деградация: с каждым новым циклом работ с магнитной системой детектора, при увеличении магнитного поля в детекторе, и после спонтанных нарушений сверхпроводимости — что, предположительно, связано с «холодной» течью криостата).

Электропитание основного соленоида (Рисунок 3.10) осуществляется током не более 8 кА от погруженного в среду жидкого гелия двуполупериодного выпрямителя тока, выполненного на основе сверхпроводящего трансформатора и двух термоуправляемых ключей, представляющих собой отрезки сверхпроводящего кабеля с намотанной поверх них нагревательной спиралью. Электропитание на выпрямитель подаётся через охлаждаемые парами кипящего при нормальном давлении гелия медные токовводы [31] трубчатой конструкции [35], рассчитанной на рабочий ток до 300 А.



**Рисунок 3.10.** Схема электропитания основного сверхпроводящего соленоида

На рисунке 3.11 приведён график подъёма магнитного поля в одном из первых совместных испытаний магнитных систем детектора КЕДР и ВЭПП-4М: остановки подъёма обусловлены согласованием режима работы ускорителя, а скачкообразное обнуление - нарушением сверхпроводимости основного соленоида после прекращения его термостатирования.



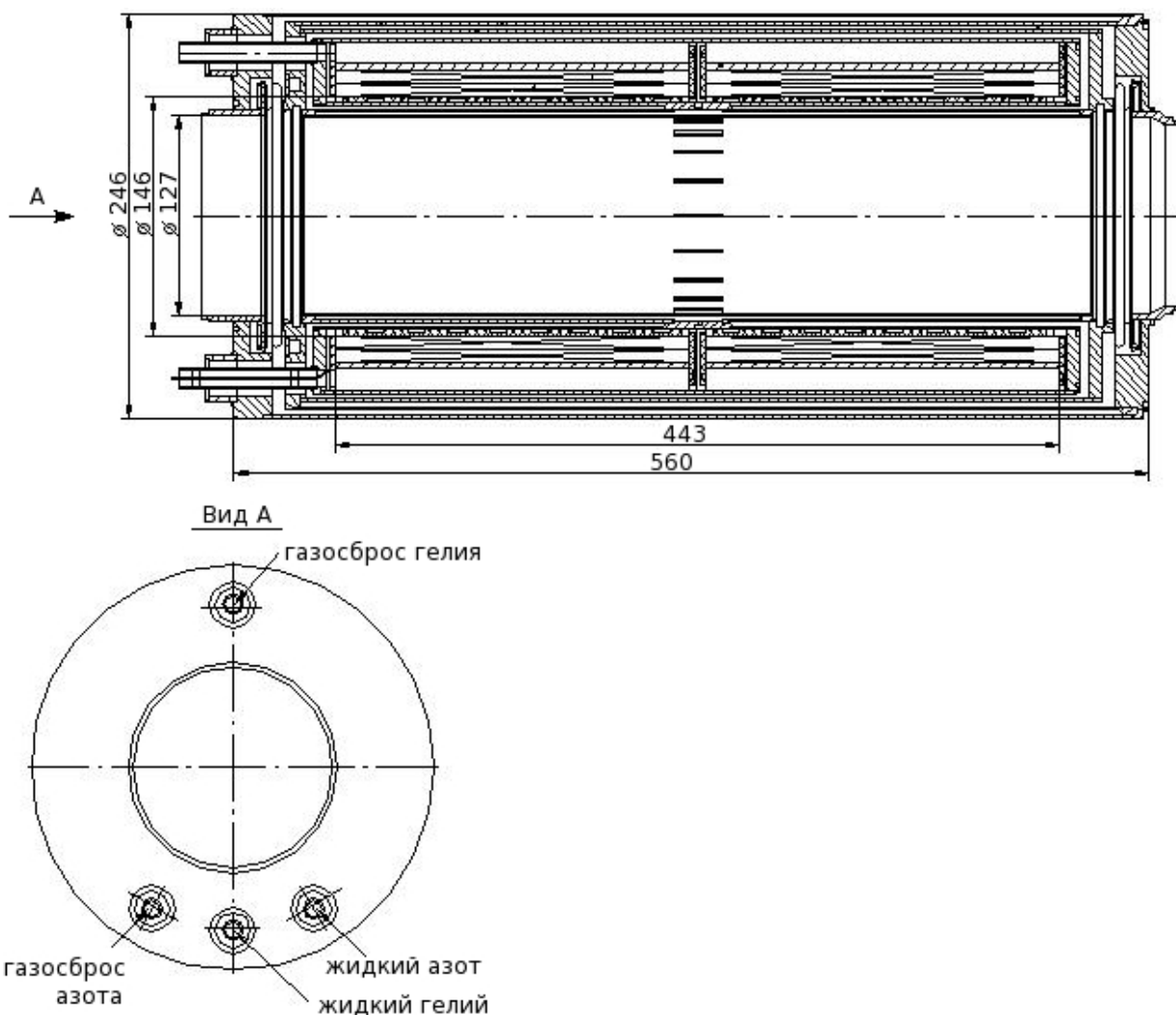
**Рисунок 3.11.** Испытательный подъём магнитного поля в детекторе КЕДР

### 3.1.2. Компенсирующие сверхпроводящие соленоиды

Два компенсирующих соленоиды одинаковой конструкции [31] (Рисунок 3.12, Таблица 3.1) служат для минимизации дестабилизирующего влияния магнитного поля детектора КЕДР на параметры фокусировки и движения пучков частиц в ускорителе (осуществляется занулением интеграла магнитного поля вдоль участка орбиты в детекторе).

Особенностью конструкции компенсирующих СП магнитов является использование их гелиевого сосуда для криосорбционной откачки вакуумной камеры ускорителя.

При максимальном магнитном поле центрального соленоида 1,83 Тл в центре детектора, магнитное поле в центре компенсирующих соленоидов составляет 5,6 Тл. Максимальное расчётное значение магнитной индукции компенсирующего соленоида составляет 6,55 Тл. Рабочий ток — 292 А. Запасённая энергия — 124 кДж. Индуктивность — 2,9 Гн. Рабочая точка выбрана так:  $I_{\text{раб}}/I_{\text{кр}}=4,6$ .

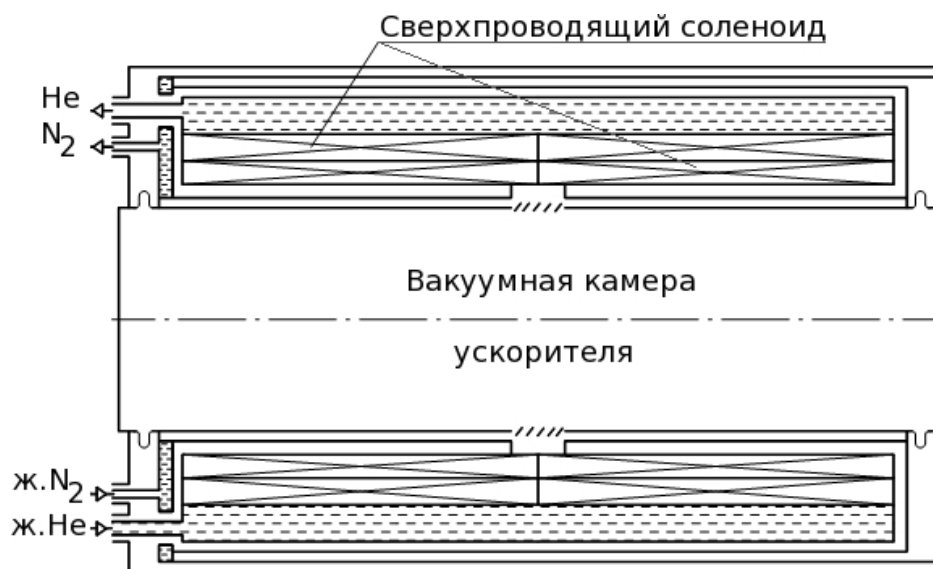


**Рисунок 3.12.** Устройство криостатов компенсирующих сверхпроводящих магнитов

Катушка компенсирующего соленоида из частично стабилизированного СП провода NbTi/Cu диаметром внутренних витков 1,0 мм и наружных — 0,7 мм содержит 7726 витков в 17 слоях. Толщина обмотки — 15,7 мм, внутренний диаметр — 146 мм, длина — 443 мм. Межслойная изоляция — стеклоткань, пропитанная эпоксидным компаундом холодного отверждения.

Поверх сверхпроводящей катушки (Рисунок 3.13) имеется азотный экран. Его верхняя продольная цилиндрическая часть — из меди толщиной 2 мм. Боковые поперечные стенки и внутренняя продольная цилиндрическая часть — из нержавеющей стали. Одна из боковых полых стенок является сосудом прокачного типа для жидкого азота.

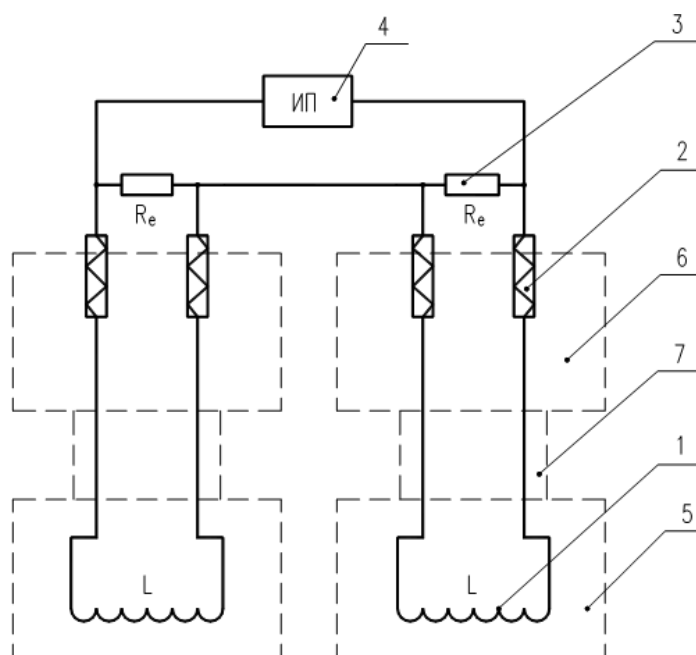
Жидкий гелий охлаждает СП катушку непосредственно — по внешнему диаметру обмотки, через бандаж из четырёх слоёв нержавеющей проволоки диаметром 1 мм. В стенках немаetalлического (из стеклотекстолита) каркаса катушки имеются дополнительные каналы для подвода охлаждающего жидкого гелия.



**Рисунок 3.13.** Схема охлаждения компенсирующего соленоида

Криостат компенсирующего магнита изготовлен из нержавеющей стали с толщиной внешней цилиндрической стенки 2 мм, внутренней — 1 мм. На последней имеются щелевые отверстия, позволяющие использовать криостат в качестве криогенного насоса (на вакуум лучше  $10^{-8}$  Па [40, стр.12]) с эффективной скоростью откачки 1400 л/с.

Полный вес криостата с компенсирующим соленоидом — 90 кг. Охранный вакуум в его теплоизолирующей полости — лучше  $1 \cdot 10^{-4}$  Па.



**Рисунок 3.14.** Схема электропитания компенсирующих сверхпроводящих электромагнитов: 1 - соленоид, 2 - охлаждаемые токовводы, 3 - внешнее разрядное сопротивление защиты (1 Ом), 4 - источник питания, 5 - криостат компенсирующей обмотки, 6 - криостат токовводов, 7 - гелиепровод.

Электропитание (Рисунок 3.14) согласованно-последовательно скоммутированных компенсирующих магнитов осуществляется от программируемого источника постоянного тока (до 300 А) через газоохлаждаемые токовводы, конструкция которых идентична используемой

для питания основного СП соленоида. Каждая пара токовводов шунтирована со стороны источника питания специальным мощным защитным резистором  $\sim 1$  Ом.

### 3.1.3. Этапы ввода магнитной системы в работу

Предварительные криогенные (до температуры жидкого азота) испытания основного сверхпроводящего соленоида были проведены на заводе-изготовителе.

Перед установкой в детектор криостат был оснащён датчиками положения, с помощью которых была проведена юстировка соленоида внутри криостата — относительно его внешнего корпуса.

Завершающие испытания основного магнита (до температуры жидкого гелия) проводились после его установки в детектор и монтажа соответствующей части криогенной системы. Компенсирующие магниты подключались и испытывались в составе детектора по очереди — по мере завершения монтажа криогенной системы. Первый компенсирующий магнит был подключен и испытан — совместно с ранее установленным основным магнитом — с 4 по 30 сентября 2002 года. В компенсирующем магните длительно вводился постоянный ток 150 А, соответствующий магнитному полю 3,3 Тл, и кратковременно — 200 А, соответствующий полю 4,4 Тл. С основным магнитом получено магнитное поле в детекторе 0,72 Тл, при котором произошёл переход основного соленоида в нормальное состояние — из-за низкого критического тока сверхпроводящих ключей источника питания.

При испытаниях магнитов расход жидкого гелия в дроссельном режиме рефрижератора составил 45 л/ч при работе основного магнита, и 50 л/ч — при одновременной работе основного и компенсирующего магнитов. В детандерном режиме расход жидкого гелия составил 35 л/ч.

В январе 2004 года криогенная и магнитная системы детектора были задействованы в полном объёме, и получен опыт непрерывной работы в детандерном режиме рефрижератора около трёх месяцев. Магнитное поле в основном соленоиде стабилизировалось на уровне 0,6 Тл, в компенсирующих — 2,17 Тл. Темп подъёма поля в детекторе ограничивался низким критическим током ключей сверхпроводящего источника электропитания основного магнита и составил в среднем 0,086 Тл в сутки [36].

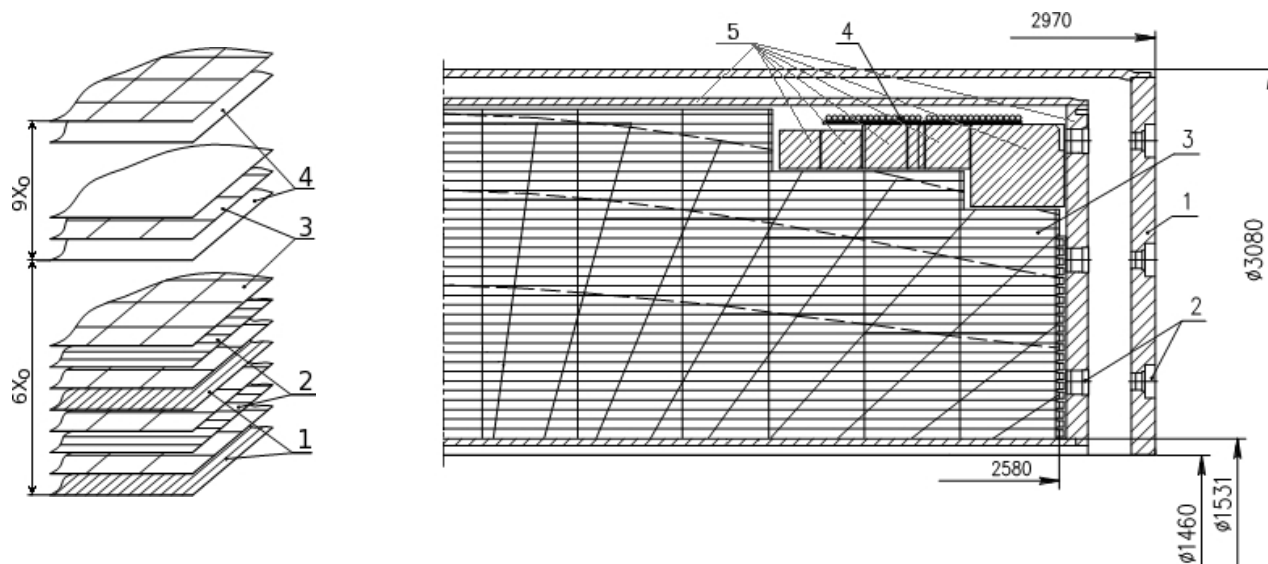
В дальнейшем сверхпроводящий источник питания неоднократно дорабатывался — с применением новых образцов сверхпроводников на основе NbTi.

### 3.2. Криогенный калориметр

Электромагнитный калориметр на основе жидкого криптона [ [37], [38], [39] ] (рисунки 3.15 и 3.16) является ионизационным спектрометром полного поглощения и предназначен для определения с высокой точностью координат конверсии  $\gamma$ -квантов и заряженных частиц, их идентификации и измерения энергии. Высокая степень гранулярности регистрирующей структуры жидкостного ионизационного детектора обеспечивает возможность идентификации заряженных частиц методом измерения пространственного распределения их энергетических потерь ( $dE/dx$ ), а также разделение электронов и пионов с использованием информации о продольной структуре ливня.

В отличие от кристаллических (на основе CsI, NaI, BGO и других) калориметров, с жидкостными калориметрами [40] возможно достичь лучшее координатное разрешение [ [41], [42] ] для фотонов [43] (примерно 1 мм для высокоэнергетических фотонов:  $100 \div 1000$  МэВ) при сравнимом энергетическом разрешении [44]. Для детектора КЕДР получено

энергетическое разрешение около 3 % для энергии 1,8 ГэВ, что близко к проектному значению [19].



**Рисунок 3.15.** Устройство калориметра (одна четверть продольного сечения): 1 - нержавеющей корпус, 2 - электровакуумные разъёмы, 3 - электроды, 4 - высоковольтные конденсаторы, 5 - алюминиевый криостат (с вытесняющими криптон кольцами). Слева — структура электродов: 1 -  $\phi$ -координатные, 2 - z-координатные, 3 - высоковольтные («башни», справа обозначенные радиально расходящимися из центра линиями), 4 - заземлённые электроды.

В качестве рабочего вещества центрального калориметра детектора КЕДР применён сжиженный при температуре  $\sim 120$  К криптон массой 27,5 тонн, заполняющий при нормальном давлении цилиндрический кольцеобразный сосуд вместимостью около  $11,3 \text{ м}^3$  из алюминиевого сплава. В жидкий криптон помещена электродная система из 34 коаксиальных цилиндрических ионизационных камер (рисунки 3.15 и 3.16). Электроды изготовлены из покрытых с двух сторон медью (толщиной 18 мкм) 35 прямоугольных листов стеклотекстолита (марки G10, толщиной 0,5 мм).



Листы собраны в коаксиальные цилиндры с шагом 20 мм по радиусу. Шаг и цилиндричность конструкции обеспечивает ребристо-ячеистая структура из плоских стяжек из неметаллизированных листов стеклотекстолита. Для заполнения межэлектродного пространства жидким криптоном, в стяжках просверлены многочисленные отверстия (Рисунок 3.16). Вес электродной системы — 930 кг. Общее количество каналов электроники калориметра равно 7240, из них 2304 канала («башни») предназначены для измерения энергии и 4936 — для измерения координат: 1864 – угловой координаты, 3072 – продольной координаты.

Преимуществом гомогенного калориметра на жидком криптоме является лучшая, чем на аргоне, компактность и на порядок меньшая, чем на обеспечивающем наилучшую компактность ксеноне (Таблица 3.2), стоимость.

**Таблица 3.2.** Физические свойства сконденсированных благородных газов

Параметр	Ar (жидкий)	Kr (жидкий)	Xe (жидкий)
Атомное число (Z)	18	36	54
Атомная масса (M)	40	84	131
Температура кипения, К	87,1	119,6	164,9
Температура плавления, К	83,6	115,8	161,9
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,4	2,43	3,06
Радиационная длина, см	13,5	4,6	2,77
Ядерная длина, см	84	60	55
dE/dX, МэВ	2,31	3,45	3,89
Энергия ионизации, эВ/пару	24,4	18,5	15,6

Впервые возможность применения сжиженного благородного газа криптона в качестве наполнителя ионизационного калориметра была исследована в ИЯФ СО РАН [ [45], [46], [47], [37], [48], [38], [39], [41], [49], [40], [42], [50], [51], [52], [53], [54], [55] ]. На прототипе [ [46], [47] ] жидкостного калориметра детектора КЕДР было показано, что шумы,

связанные с содержанием в криптоне природного  $\beta$ -радиоактивного изотопа  $^{85}\text{Kr}$  с периодом полураспада 10,5 лет, не превышают шумов регистрирующей электроники и не должны быть сдерживающим фактором его применения в детекторах.

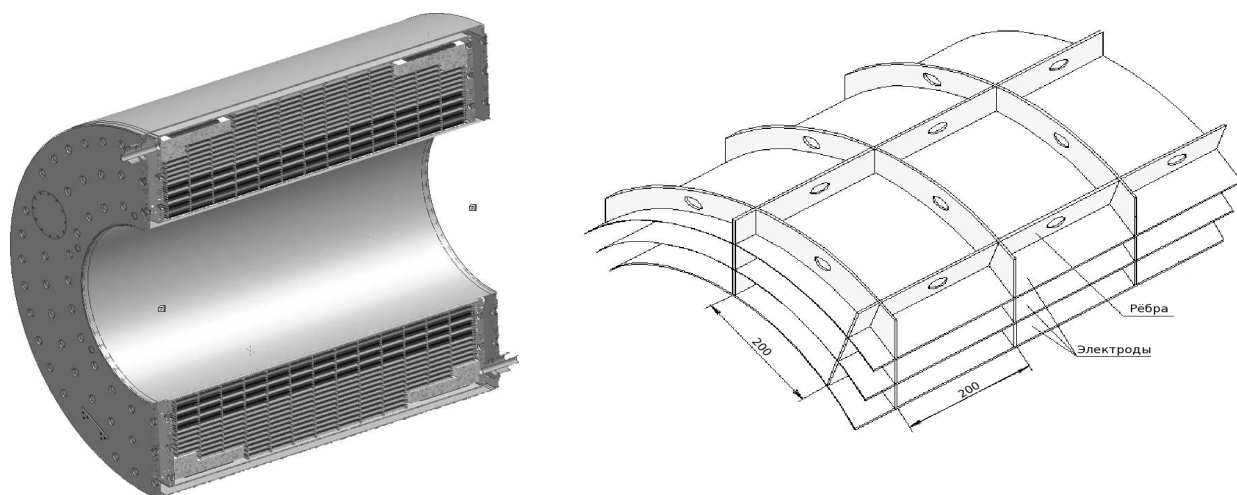
### 3.2.1. Криптоновый криостат

Криптоновый холодный сосуд калориметра [56] представляет собой (рисунки 3.15 и 3.16) кольцеобразный цилиндрический алюминиевый корпус (толщина стенки наружного кольца — 18 мм, внутреннего — 14 мм) объёмом  $13\text{ м}^3$ , подвешенный внутри тёплого корпуса (из нержавеющей стали) при помощи подвесок, попарно крепящихся за каждую плоскую боковую стенку. Толщина торцевых стенок холодного сосуда — 45 мм, тёплого — 50 мм. Подвески имеют тепловую развязку из стекловолоконного пластика. Внутренняя цилиндрическая стенка (толщиной 1 мм) тёплого стального (нержавеющего) корпуса гофрирована для прочности. Наружная — имеет толщину 16 мм. Рабочий вес криптонового сосуда (с криптоном) — 37 тонн. Полный рабочий вес калориметра (с учётом тёплого корпуса) — 43 тонны.

При конструировании калориметра применялись немагнитные материалы с наименьшим радиационным поглощением. В целях экономии жидкого криптона (до 13 % объёма калориметра), по внешнему радиусу на фланцах внутри алюминиевого криптонового сосуда закреплены объёмные составные кольца прямоугольного сечения из аналогичного алюминиевого сплава (рисунки 3.15 и 3.16). Таким способом криптон вытесняется из нерабочей зоны калориметра, заполняя лишь полезный объём  $11,3\text{ м}^3$ .

На торцах корпуса калориметра имеются регулируемые опоры для его постановки на нижние элементы ярма детектора и совмещения оси симметрии с осью симметрии детектора. Для подачи (и слива) жидкого криптона, внизу

одного из фланцев криостата калориметра существует патрубок криогенного трубопровода. На противоположном торце – вверху – патрубок для отвода паров криптона. Часть (более трети) полезного сечения верхнего патрубка занимают электрические провода высоковольтного питания (электроники) калориметра.



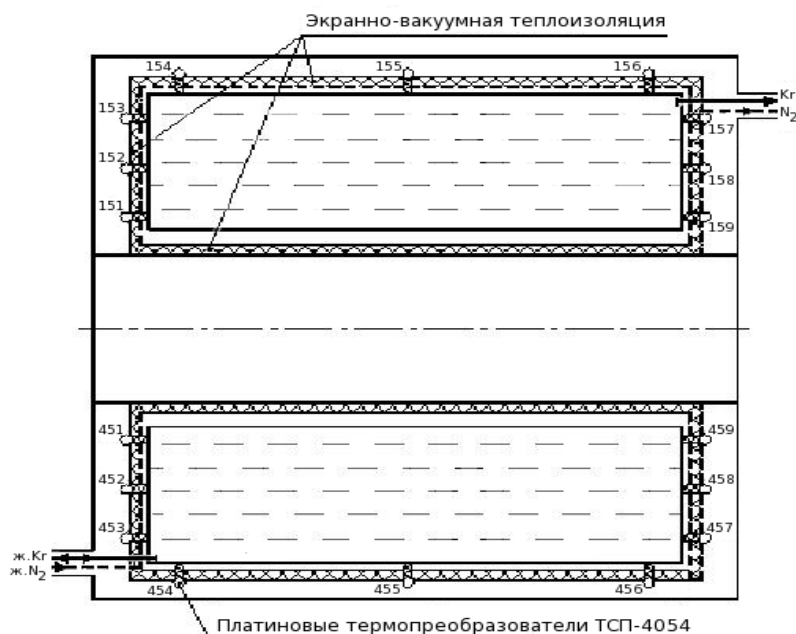
**Рисунок 3.16.** Устройство криостата и электродов жидкокриптонового калориметра

Необходимо отметить особо, что допустимое в криостате калориметра рабочее избыточное давление криптона газообразного над уровнем жидкого весьма мало – 0,02 МПа. При превышении до 0,03 МПа этого давления, через предохранительный клапан газообразный криптон должен аварийно сбрасываться в окружающую среду, предохраняя внутренний алюминиевый сосуд криптонового криостата от разрушения.

### 3.2.2. Теплоизоляция

По внешней поверхности алюминиевого криптонового сосуда — на обоих торцах и в верхней трети цилиндрической поверхности — приварена

трубка змеевидного азотного теплообменника (Рисунок 3.17). Его назначение — захлаживание, термостатирование криптонового сосуда и конденсация паров криптона посредством теплового контакта с жидким азотом, кипящим при избыточном давлении до 0,5 МПа (либо с жидким азотом, предварительно нагретым до температуры жидкого криптона под давлением до 23 МПа).



**Рисунок 3.17.** Теплоизоляция и датчики температуры на криптоновом сосуде калориметра в плоскости вертикального сечения, в горизонтальной - аналогично.

Вся поверхность криптонового сосуда покрыта  $3 \times 30$  слоями экранно-вакуумной изоляции (ПЭТФ-Э-ДА-12 + БМД-К).

Пространство между алюминиевым и нержавеющей сосуда вакуумируется. Рабочий вакуум —  $2 \cdot 10^{-4}$  Па. Его обеспечивает магниторазрядный насос (НОРД) с дополнительной азотной ловушкой (криогенным абсорбером), а также вспомогательный агрегат предварительного

вакуумирования, состоящий из турбомолекулярного (ТМН-500) и двух форвакуумных (АВР-50Д и НВПР) насосов.

Проектный теплоприток к криостату криптонового калориметра из окружающей среды — 69 Вт. Его значение по результатам оценочных криогенных испытаний — 165 Вт. Различие, предположительно, связано с неидеальным качеством экранно-вакуумной теплоизоляции, что, однако, не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на работоспособность калориметра.

### 3.2.3. Измерители температуры

Снаружи на криптоновом сосуде, в вакууме, размещены (рисунки 3.17 и 3.18) платиновые датчики контроля температуры ТСП-4054: по 11 штук — на каждом из торцов, а так же 12 — на цилиндрической стенке. В дополнение к ним, на торцах установлено по одному датчику на основе термокалиброванных полупроводниковых диодов. Восемь таких же датчиков — двумя группами по четыре штуки — вблизи торцов на внутренней цилиндрической стенке криостата, а внутри криптонового сосуда — ещё шесть таких же датчиков, и два платиновых (ТСП-4054). Всего задействовано 50 термодатчиков.

Для крепления установленных в вакууме на поверхности криптонового сосуда термодатчиков были использованы специальные приваренные к корпусу сосуда зажимы-капсулы из брусков дюрэли с калиброванным горизонтальным сквозным отверстием под цилиндрический длинный корпус датчика и боковым разрезом по всей длине отверстия, стягивающимся винтами.

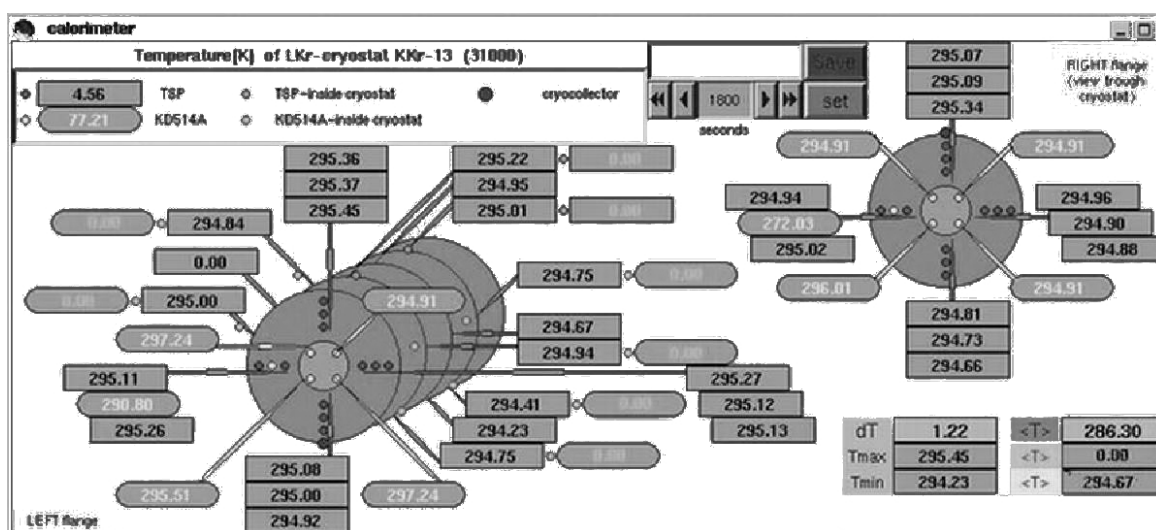


Рисунок 3.18. Мнемосхема. Термодатчики жидкокриптонового калориметра

### 3.2.4. Этапы ввода калориметра в работу

После криогенных испытаний в мае 1999 года центральный калориметр был установлен в детектор КЕДР. В сентябре 2001 года впервые заполнен жидким криптоном. В марте 2002 года проведены первые тестовые эксперименты. В последующий период была осуществлена очистка криптона от электроотрицательных примесей, позволившая увеличить длину свободного пробега электронов ионизации в жидком криптоме с 1 мм до 8 мм. С конца 2003 года калориметр был готов к полноценной работе на эксперимент в составе детектора [42].

## Глава 4. Криогенное обеспечение детектора КЕДР

Для заполнения рабочим веществом, захлаживания до рабочей температуры, длительного термостатирования, отогрева и опорожнения криогенных компонент детектора КЕДР и дополнительного технологического криогенного оборудования разработана (Таблица 4.1) система криогенного обеспечения (СКО) [57].

**Таблица 4.1.** Основные проектные технические параметры СКО

Наименование параметра	Значение параметра
Холодопроизводительность на уровне 120 К, Вт	1200
Холодопроизводительность на уровне 4,2 К, Вт	600
Масса хранимого жидкого азота (не более), т	101,6
Масса хранимого жидкого криптона (не более), т	46,8
Масса жидкого гелия в оборудовании, т	0,300 ÷ 0,675
Массовый расход гелия при давлении 2,3 ÷ 2,5 МПа и температуре 300 К, кг/ч	120
Массовый расход гелия при давлении 13 ÷ 15 МПа и температуре 300 К, кг/ч	6,9
Вид управления	ручной, дистанционный, автоматический
Время непрерывной работы в течение года, ч	5000 ÷ 8000
Срок службы, лет	10

Рабочим веществом СКО являются (Таблица 4.2) сконденсированные криптон (рабочая температура ~ 120 К), гелий (рабочая температура ~ 4,5 К) и азот (рабочая температура (~ 80 К), а также газообразный гелий (рабочая температура ~ 300 К). Жидкий криптон — рабочее вещество ([58],[59]) центрального калориметра. Жидкий гелий — основной хладагент ([60],[61]) СП магнитов. Жидкий азот — основной хладагент [62] теплозащитных и

конденсационных теплообменников СКО. Сжатый газообразный гелий используется в качестве рабочего газа системы пневмоуправления (редуцированием с 15 до 4,7 МПа) и гелиевого рефрижератора (2,5 МПа). Газообразный азот используется в качестве заместителя воздушной (кислородосодержащей) среды вокруг торцов центральной дрейфовой камеры детектора КЕДР.

**Таблица 4.2.** Основные характеристики рабочих криоагентов ([63],[64])

Наименование параметра	Гелий (He)	Криптон (Kr)	Азот (N <sub>2</sub> )
Атомное число (Z)	2	36	14
Атомная (молекулярная) масса, а.е.м.	4,0	83,8	(28,0134)
Плотность газа (20 °С), кг/м <sup>3</sup>	0,1785	3,708	1,2506
ТОЧКА КИПЕНИЯ, норм. (1 бар)			
Температура, К	4,222	119,77	77,36
Плотность жидкость/газ, кг/м <sup>3</sup>	125,4 / 15,75	2412 / -	808,2 / 4,512
Энтальпия, кДж/моль	0,084	9,05	5,59
Теплоёмкость C <sub>p</sub> жидк./газ, кДж/(кг·К)	4,5 / 7,3	-	-
Теплопроводность жидк./газ, Вт/(м·К)	0,028 / 0,008	-	0,077 (82 К)
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,0579 (70 К) 0,1437 (273 К)	0,0095 (300 К)	0,243 (273 К) 0,315 (373 К)
ТРОЙНАЯ ТОЧКА			
Температура, К	нет (λ: 2,1768)	115,76	63,15
Давление, кПа	5,048	73,2	12,46
КРИТИЧЕСКАЯ ТОЧКА			
Температура, К	5,1953	209,39	126,26
Давление, кПа	227,46	5496	3399
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	69,64	910,75	313,11
Инверсная температура, К	43	-	623
Изменение плотности жидкость/газ от точки кипения до давления 1 бар	701	650	646

По виду рабочего криопродукта оборудование СКО подразделяется на:



- гелиевое;
- криптоновое;
- азотное.

По функциональному назначению оборудование СКО относится к нескольким подсистемам (обозначение указано согласно техническому описанию СКО [57]):

- СТА-50/120 — оборудование, обслуживающее ЖК калориметр, выделено в систему термостатирования азотную (СТА) [65];
- СТГ-120/4,5 — оборудование, занятое в обеспечении СП магнитов, объединено в систему термостатирования гелиевую (СТГ) [66];
- СХА-150/0,6 — накопление, хранение и выдача жидкого и газообразного азота возложено на систему хранения азотную (СХА) [67];
- СХКр-40/0,6 — накопление, хранение и выдача жидкого и газообразного криптона возлагается на систему хранения и выдачи криптона (СХКр) [68];
- СПУ — для управления криогенными клапанами с пневматическим приводом используется сжатый гелий с редуцированным давлением с 15 МПа до 4,7 МПа в газовой системе пневмоуправления (СПУ) [69];
- КС — сбор (приём покупного, утилизация паров [70]), хранение, производство и выдачу гелия в жидком (~ 200 л/ч от «КГУ-500») и сжатом (~ 200 кг/ч @ 2,5 МПа; ~ 40 кг/ч @ 15 МПа) виде, а также частичную потребность (менее 20 %) в жидком азоте (от станции «Linde») удовлетворяет специализированная криогенная станция (КС), непрерывно обеспечивающая работу СКО детектора КЕДР.

#### **4.1. СТГ — система термостатирования гелиевая**

Система термостатирования гелиевая (Таблица 4.3) [66] предназначена

для заполнения чистым (марки «А») гелием, охлаждения до температуры  $\sim 80$  К, заполнения жидким гелием, охлаждения до температуры  $\sim 4,2$  К, длительного ( $\sim 180$  суток и более) термостатирования на уровне 4,5 К при нормальном давлении и отогрева до температуры окружающей среды ( $\sim 300$  К) основного и компенсирующих СП магнитов детектора КЕДР.

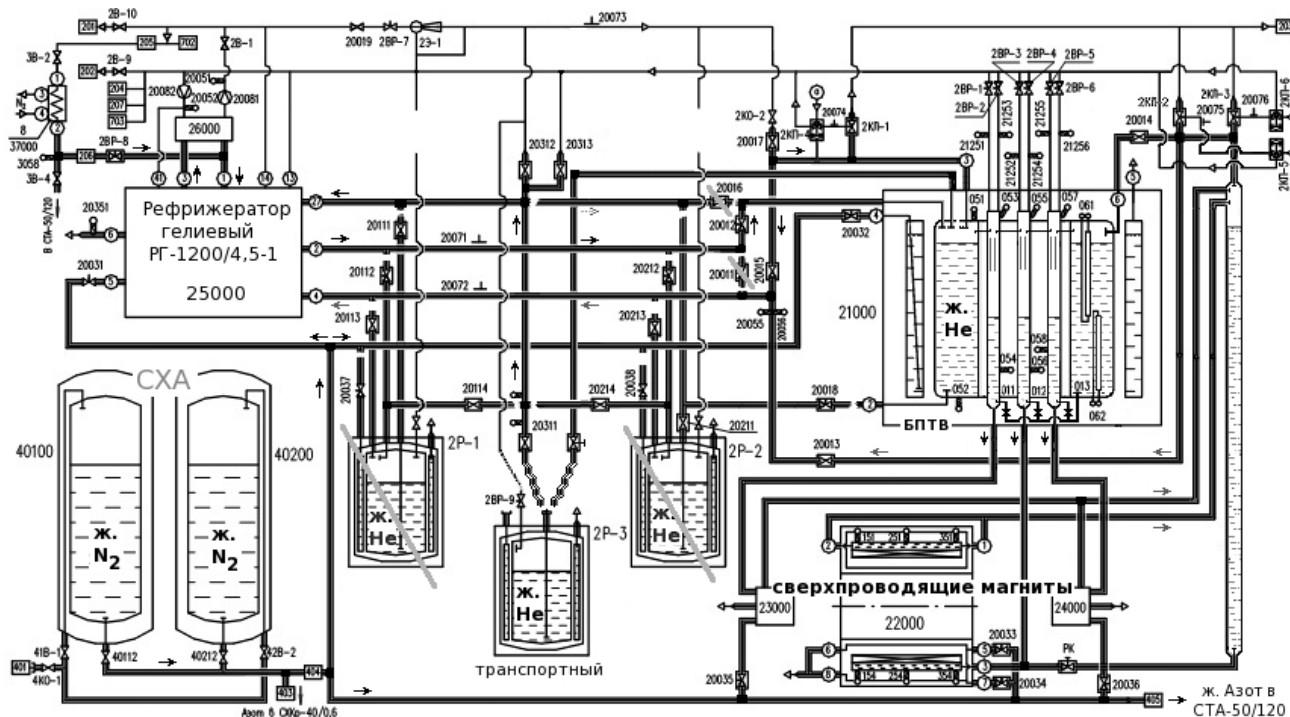
Принципиальная схема на рисунке 4.1 отображает взаимосвязи используемого в СТГ оборудования [66].

Термостатирование осуществляется за счёт теплового контакта с жидким гелием, кипящем при давлении 0,131 МПа.

Для снижения теплопритока к гелиевым сосудам криостатов СП магнитов используется вспомогательный хладагент — жидкий азот. Он продувается при давлении до 0,5 МПа через тонкостенные медные трубки, находящиеся в тепловом контакте с металлическими радиационными экранами внутренней и внешней цилиндрических поверхностей соленоидов.

**Таблица 4.3.** Проектные параметры системы термостатирования гелиевой СТГ-1200/4,5

Наименование параметра	Значение параметра
Холодопроизводительность на уровне 4,5 К, Вт	600
Параметры гелия входящего прямого потока: <ul style="list-style-type: none"> <li>• температура, К</li> <li>• рабочее давление, МПа</li> <li>• массовый расход, кг/ч</li> </ul>	300 2,3 ÷ 2,5 120
Масса хранимого жидкого гелия для подпитки рефрижератора (оперативный запас), кг	300 ÷ 375
Вспомогательный криоагент для охлаждения теплозащитных радиационных экранов криогенного оборудования	Азот жидкий
Контроль параметров	дистанционный
Вид управления	Дистанционное, или автоматическое

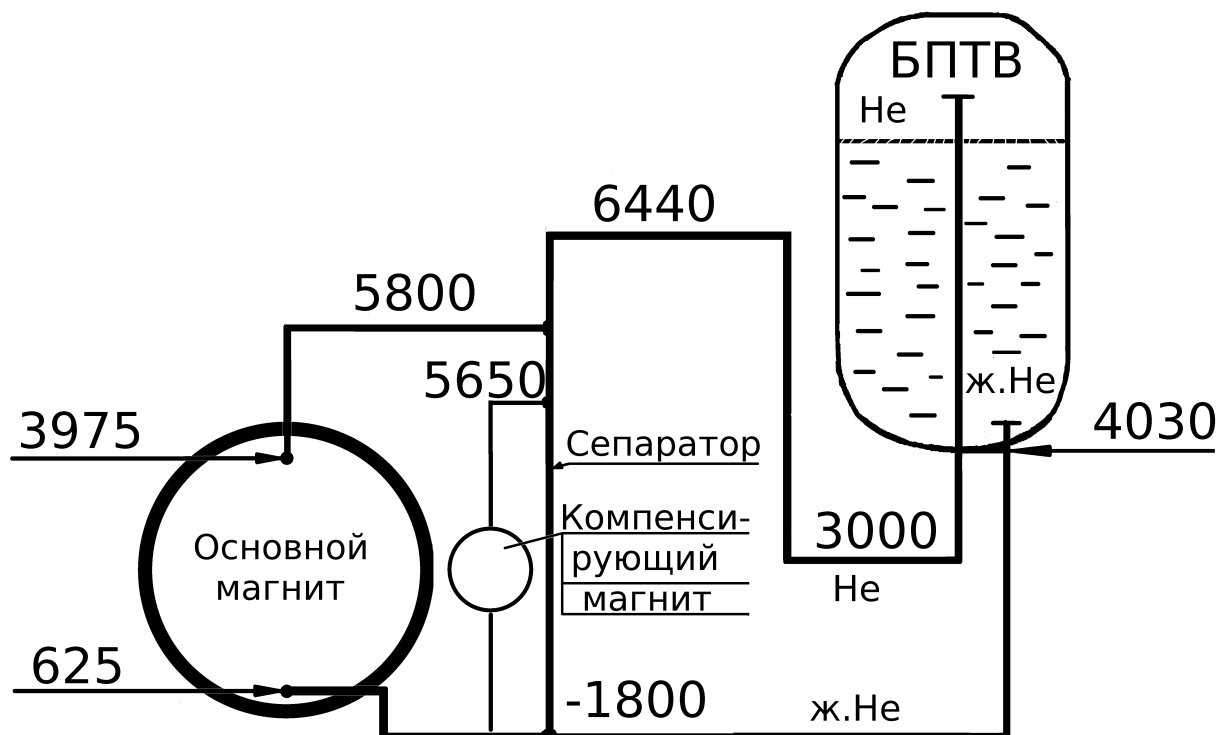


**Рисунок 4.1.** Схема гелиевой системы (СТГ) термостатирования сверхпроводящих магнитов и системы хранения и выдачи жидкого азота (СХА). Разрывы связей и зачёркнутые элементы отражают модификацию исходного проекта системы

В случае основного магнита [71], азотная трубка изогнута в виде змеевика, покрывающего цилиндрическую поверхность теплового экрана. В случае компенсирующих магнитов, трубка соединяется с цилиндрическими экранами по торцам.

Теплоприток из окружающей среды к термостатируемым жидким гелием объектам компенсируется замещением тёплых паров гелия над ними парожидкостной смесью с температурой 4,5 К из гелиевого рефрижератора и восполнением уровня жидкого хладагента гидростатическим напором из сообщающегося с криостатами магнитов сосуда-накопителя жидкого гелия — так называемого блока питания токовых вводов (БПТВ) [72].

Схема подачи жидкого гелия в магниты показана на рисунке 4.2.



**Рисунок 4.2.** Схема высотных отметок трубопроводов подачи жидкого гелия в магниты и сбора газообразного гелия

#### 4.1.1. БПТВ — блок питания токовых вводов

В сосуде БПТВ (рисунки 4.1, 4.3) [72] тепловым экраном является накопитель жидкого азота, цилиндрическим кольцом окружающий гелиевый сосуд аналогичной формы и отделённый от него вакуумируемым промежутком. В центре последнего, в вакууме, проходят снизу вверх четыре вертикальные трубы.

По центральной трубе сообщаются пары гелия, по трём другим жидкий гелий из гелиевого накопителя БПТВ вливается в сообщающиеся гелиевые сосуды криостатов магнитов самотёком. Для этого сосуд БПТВ установлен относительно криостатов СП магнитов на должном возвышении — на антресоли площадки криогенного обеспечения детектора КЕДР (Рисунок 4.2).

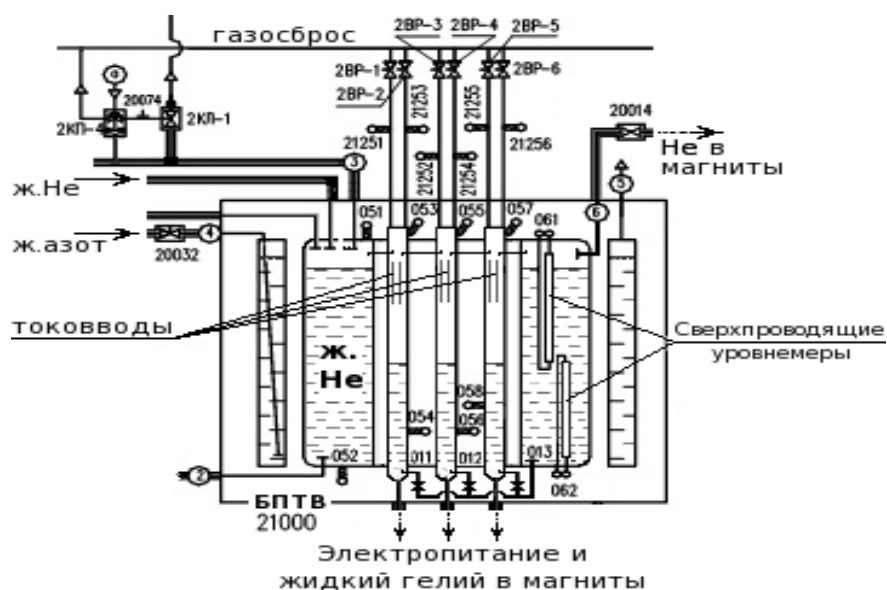


Рисунок 4.3. Устройство БПТВ

#### 4.1.2. Токовводы

В верхней части (Рисунок 4.3) гелиевых труб БПТВ находятся попарно токовводы [31], охлаждаемые парами гелия, поступающего в нижнюю часть труб. Пары гелия, пройдя через трубчатую конструкцию токовводов, нагреваются до температуры окружающей среды и отводятся в систему утилизации, на криогенную станцию.

Организована принудительная индивидуальная откачка паров через токовводы, несмотря на то, что устройства рассчитаны на естественный конвективный теплообмен. Это гарантирует одинаковое охлаждение всей пары в случае, если один из токовводов начнёт перегреваться, и весь поток охлаждающих паров устремится через более холодный второй, с меньшим противодействием, усугубляя перегрев первого и провоцируя вывод из сверхпроводящего состояния присоединённых к нему СП шинпровода и, далее, СП трансформатора и(или) СП соленоида.

Для откачки паров гелия из каналов токовводов задействован один

эжекторный насос от имеющейся в системе линии подачи среднего давления сжатого гелия (2,5 МПа) и индивидуальные вентили газового натекания с ручной регулировкой. Как показала практика, достаточно однократной настройки данной системы откачки.

#### 4.1.3. РГ — рефрижератор гелиевый

Рядом с сосудом БПТВ размещён рефрижератор гелиевый (РГ) РГ-1200/4,5 [73]. Это блок сателлитного [ [74], [75] ] типа — обслуживающий его компрессор гелия среднего давления (2,5 МПа, 200 кг/ч) находится на отдалённой до 600 м криогенной станции.

Внутри сателлитного блока РГ находятся гелиевые теплообменники, рассчитанные на эффективное использование энтальпии избыточного обратного потока паров низкого давления (испаряющегося из СТГ жидкого гелия) для охлаждения входного потока сжатого до 2,5 МПа гелия с входной температурой  $\sim 80$  К.

Для работы с потоком гелия, имеющего температуру окружающей среды ( $\sim 300$  К), перед блоком РГ установлен дополнительный внешний гелиевый теплообменник.

Азотная ванна на входе, типичная для устройства рефрижераторов, заменена внешним азотно-гелиевым теплообменником прокачного типа. Он включается в работу только в режиме захолаживания СТГ до  $\sim 80$  К.

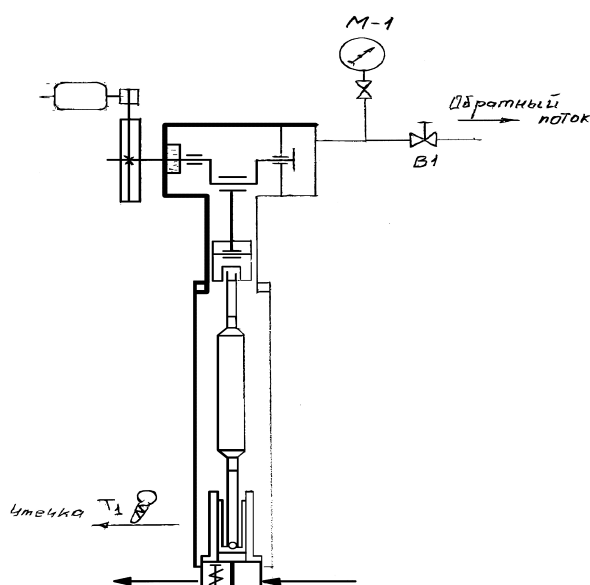
Получение парожидкостной смеси из сжатого гелия прямого потока построено на использовании в последней ступени охлаждения дроссельного вентиля Джоуля-Томсона (ДТ) перед ванной с жидким гелием.

Расчётная холодопроизводительность рефрижератора [73] в дроссельном режиме работы на температурном уровне 4,5 К при расходе сжатого гелия 60 кг/ч и подпитке жидким гелием в количестве 6 кг/ч

составляет 306 Вт. При расходе 120 кг/ч и подпитке 12 кг/ч — 600 Вт.

#### 4.1.4. Поршневой детандер

Дополнительную холодопроизводительность рефрижератор может получить от включения в прямой поток перед дроссельным вентиляем ДТ (Джоуля-Томпсона) поршневого детандера (Рисунок 4.4), рассчитанного на работу в диапазоне температур от 11 до 6,5 К [ [76], [77] ].



**Рисунок 4.4.** Устройство поршневого детандера

Гелиевый рефрижератор работает по циклу среднего давления с детандированием в прямой поток сжатого гелия и подпиткой жидким гелием в количестве  $4 \div 10 \%$  от величины циркуляционного расхода ( $60 \div 120$  кг/ч). Рассчётная холодопроизводительность рефрижератора в детандерном режиме работы на температурном уровне 4,5 К при расходе сжатого гелия 60 кг/ч и подпитке жидким гелием в количестве 6 кг/ч составляет 324 Вт [73].

Жидкий гелий для подпитки рефрижератора производится на криогенной

станции, доставляется в транспортных сосудах Дьюра (емкостью 500 л, 450 л, или 250 л) и под давлением до 0,07 МПа, создаваемым эжекторным насосом, вытесняется из них в гелиевый сосуд-накопитель БПТВ. Предусмотрена возможность пополнения жидким гелием из транспортных сосудов непосредственно сосуда-накопителя внутри РГ — включением в работу встроенного в РГ эжекторного насоса.

Требуемая для СТГ чистота гелия (марки «А») достигается предварительным ожижением более загрязнённого покупного гелия (марки «Б») на криогенной станции. Кроме того, применяются дополнительные криогенные фильтры после компрессоров, снабжающих СТГ сжатым гелием.

Используется бездренажный рабочий цикл гелия в СТГ. Однако, наблюдаются утечки гелия в атмосферу, связанные как с недостатками технологического цикла в процедурах транспортирования и переливания жидкого гелия, так из-за изношенного оборудования криогенной станции (компрессорного), а также наличия мелких течей в большом количестве разъёмных соединений гелиевого оборудования СТГ. По наблюдениям, потери газообразного гелия составляют  $\sim 30 \text{ м}^3$  в сутки.

#### **4.2. СТА — система термостатирования азотная**

Система термостатирования азотная СТА-50/120 предназначена (Таблица 4.4) для начального заполнения газообразным криптоном, охлаждения до рабочей температуры, заполнения жидким криптоном, длительного (несколько лет) термостатирования на уровне  $\sim 120 \text{ К}$  при нормальном давлении и отогрева до температуры окружающей среды ( $\sim 300 \text{ К}$ ) центрального жидкостного калориметра [56] детектора КЕДР.

Принципиальная схема на рисунке 4.5 отображает взаимосвязи



используемого в СТА оборудования [65].

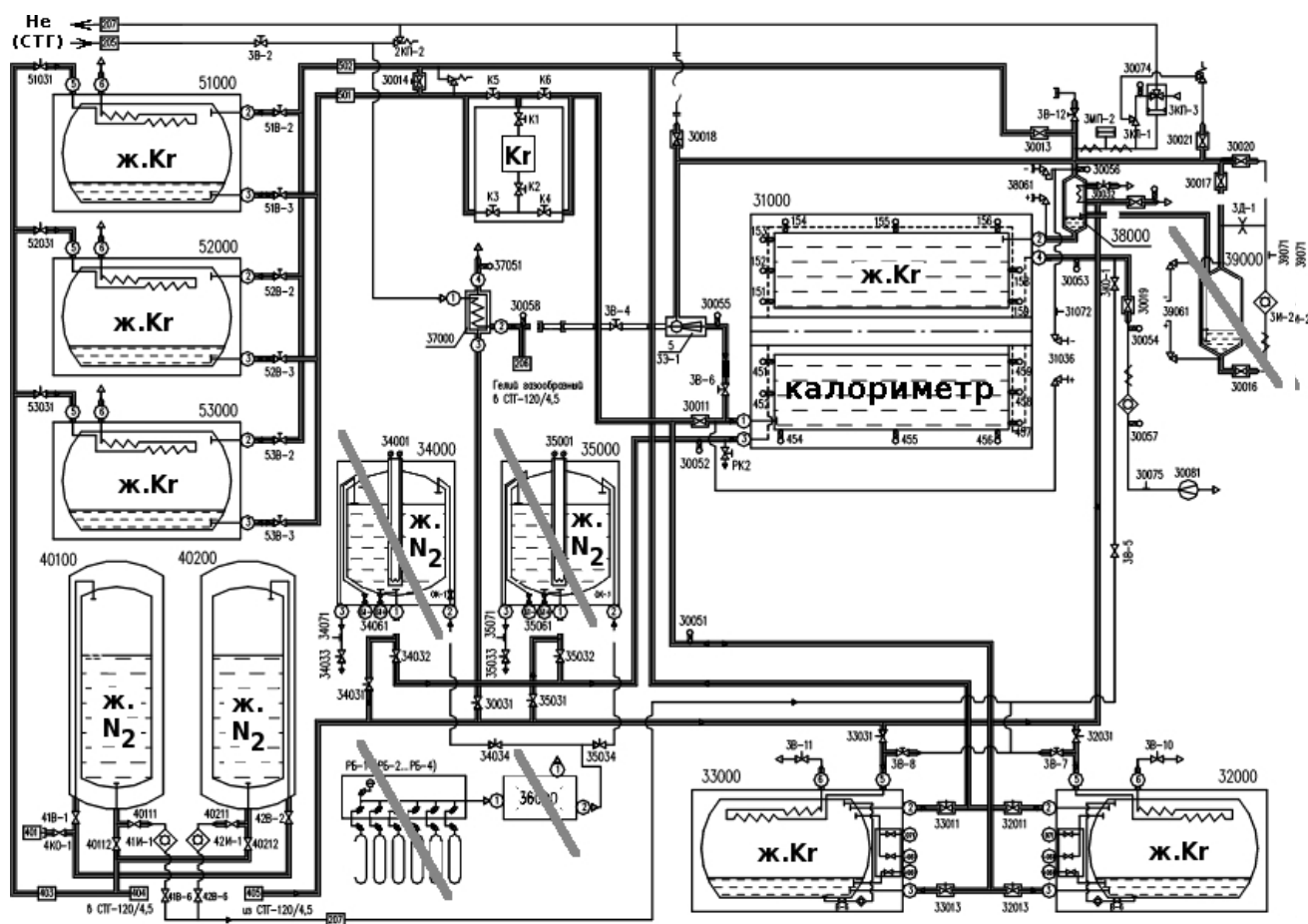
Криптон имеет высокую стоимость, поэтому для работы с ним предусмотрена бездренажная технология, предотвращающая утечки в атмосферу (кроме аварийной защиты криогенного оборудования).

Термостатирование калориметра осуществляется тепловым контактом криптона с жидким азотом, периодически пропускаемым под давлением не более 0,5 МПа через алюминиевую трубку азотно-криптонового теплообменника, приваренную к поверхности алюминиевого криптонового сосуда криостата калориметра вдоль плоских боковых и в верхней трети цилиндрической стенок. Пары азота сбрасываются в атмосферу. Пары криптона конденсируются внутри калориметра, за счёт чего давление в калориметре остаётся в рабочем диапазоне.

**Таблица 4.4.** Проектные параметры азотной системы термостатирования СТА-50/120

Наименование параметра	Значение параметра
Холодопроизводительность на уровне 120 К (проект), Вт	70 ÷ 1400
Расход жидкого азота с давлением 2,2 МПа и температурой 118 К на охлаждение криптонового криостата (проект), кг/ч	2,5 ÷ 50
Холодопроизводительность на уровне 80 К, Вт (охлаждение 40 кг/ч в блоке теплообменном гелиевом)	12700
Расход жидкого азота с давлением до 0,5 МПа в блок теплообменный гелиевый, кг/ч (в режиме охлаждения оборудования СТА и СТГ)	140
Масса жидкого криптона в криостате калориметра (не более), кг	31360
Вид управления	ручной дистанционный автоматический
Контроль параметров	дистанционный

Стабильность температуры жидкого криптона определяет стабильность скорости дрейфа в нём заряженных частиц — важный параметр калориметра.



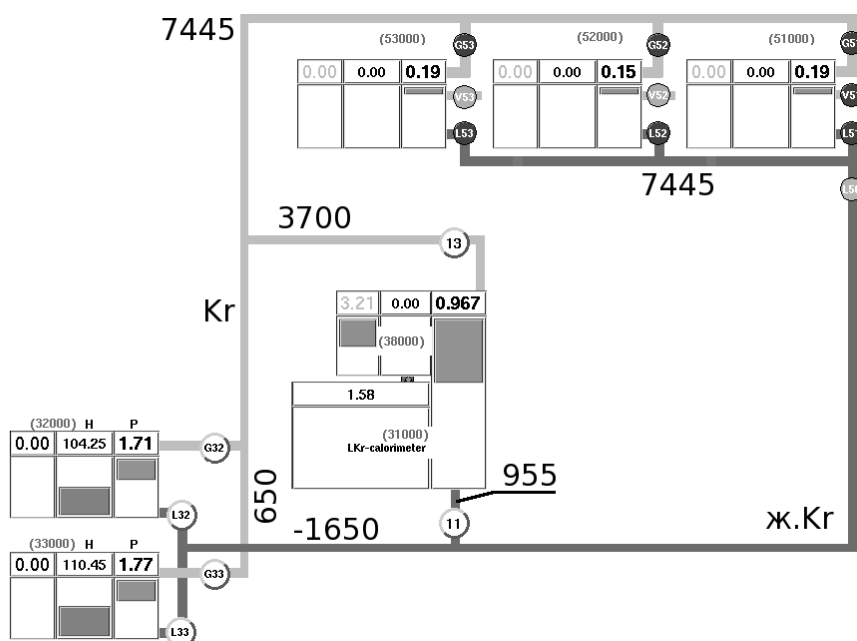
**Рисунок 4.5.** Система термостатирования азотная (СТА). Разрывы связей и зачёркнутые объекты отражают внесённые в проект изменения. Символ «ж.» обозначает «жидкий».

#### 4.2.1. Буферные хранилища

При экстренной эвакуации жидкого криптона задействуются два резервуара — накопителя жидкого криптона вместимостью  $6 \text{ м}^3$  жидкости каждый. Это так называемые аварийные (нижние, буферные) хранилища. Они находятся ниже уровня криптона в калориметре (Рисунок 4.6), поэтому жидкий

криптон может поступать в них под собственным гидростатическим давлением, то есть самотёком.

При геометрическом объёме криптонового сосуда  $8 \text{ м}^3$ , его верхнюю часть занимает (Рисунок 4.8) наклонный азотно-криптоновый теплообменник. Вследствие теплопритока из окружающей среды, происходит испарение жидкого криптона, приводящее к росту давления в сосуде. При прокачке через теплообменник жидкого азота под избыточным давлением (до  $0,5 \text{ МПа}$ ), пары криптона конденсируются на его поверхности. Это обеспечивает снижение давления газа в сосуде. За счёт наклонной конструкции теплообменника конденсат стекает в криптоновый сосуд.



**Рисунок 4.6.** Отметки на упрощённой мнемосхеме уровней (в миллиметрах) трубопроводов криптоновой системы по высоте: в центре — калориметр, внизу — буферные приёмники жидкого криптона,верху — хранилища жидкого криптона

Выдача жидкого криптона из буферных хранилищ может осуществляться

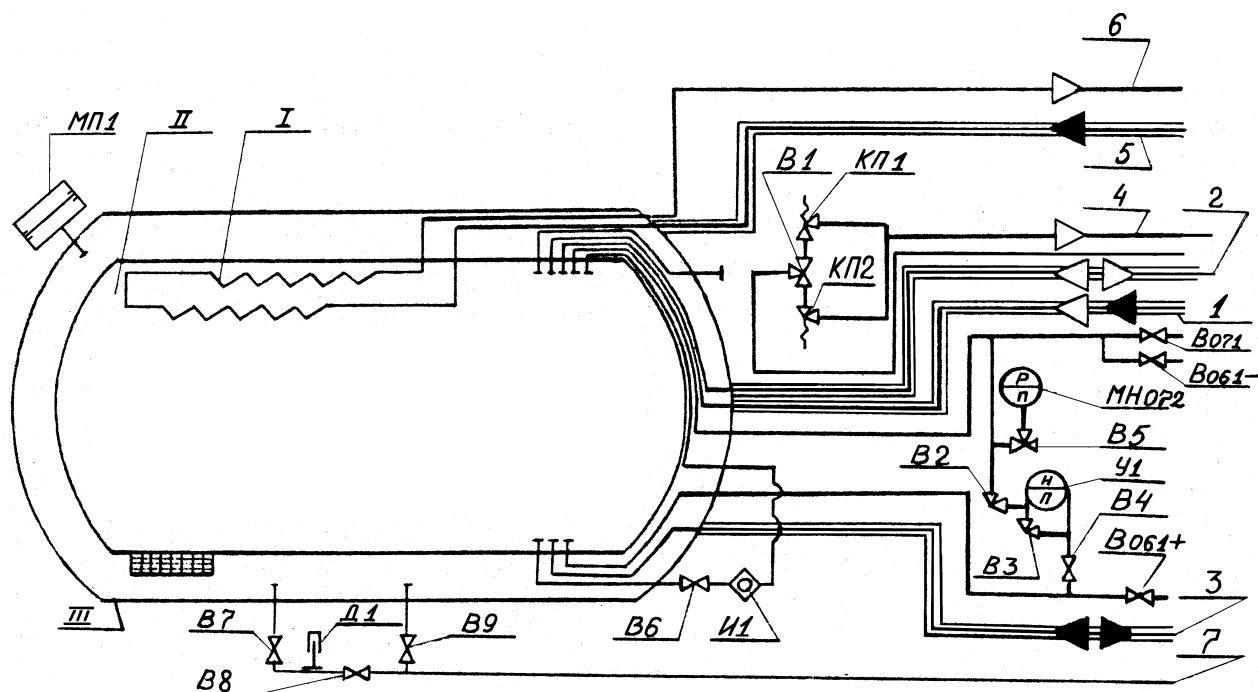
под избыточным давлением до 0,6 МПа. Для этого они оборудованы встроенными испарителями жидкого криптона. За счёт тепла из окружающей среды жидкий криптон в них испаряется и возвращается обратно в виде газа, поднимая рабочее давление паров над жидкостью и способствуя её вытеснению в раздаточный криптоновый коллектор. Выдача осуществляется либо в хранилища жидкого криптона, либо обратно в калориметр. Предусмотрено использование буферных хранилищ в режиме очистки криптона.

### **4.3. СХКр — система хранения и выдачи жидкого криптона**

Первоначальное ожижение газообразного криптона, а также дальнейшее хранение жидкого криптона и его выдачу осуществляет система хранения и выдачи криптона СХКр-40/0,6 (Таблица 9) [68].

В составе системы три специальных резервуара (Рисунок 4.8) вместимостью по 6 м<sup>3</sup> жидкости, или по 8 м<sup>3</sup> газа при нормальном давлении. Каждый резервуар оборудован встроенным азотно-криптоновым теплообменником-конденсатором газообразного криптона, а также испарителем жидкого криптона — системой самонаддува.

Резервуары полностью идентичны тем, что применяются для эвакуации жидкого криптона из калориметра. Отличие — в комплектации дополнительного внешнего оборудования (так называемой обвязки): наличие клапанов-регуляторов на выходе азотно-криптонового теплообменника и клапанов ручного управления вместо автоматических на всех криптоновых трубопроводах.



**Рисунок 4.8.** Криптоновый резервуар. Схема пневмогидравлическая принципиальная: I - конденсатор; II - внутренний сосуд; III - наружный кожух; 1 - подача криптона; 2 - газосброс криптона; 3 - слив криптона; 4 - дренаж криптона; 5 - подача жидкого азота; 6 - газосброс азота; 7 - вакуумирование; В1 - клапан АСК-25-25/63; В2, В3, В4, V061-, V061+, V071 - клапан АЗТ-20-4/63; В5 - клапан АЗК-20-4/63; В6 - клапан АЗК-20-25/63; В7, В8 - вентиль вакуумный сильфонный; В9 - клапан вакуумный; КП1, КП2 - клапан предохранительный; МП1 - мембрана предохранительная кожуха; И1 - испаритель; МН - манометр ЭКМ-1У; У1 - дифманометр ДСП-УС; Д1 - измеритель вакуума ПММ-32-1.

Хранилища установлены на уличной антресоли, обеспечивающей превышение по высоте их нижних точек над верхней точкой калориметра. За счёт перепада высот, заполнение калориметра из хранилищ осуществляется под действием гидростатического давления жидкого криптона, то есть самотёком (Рисунок 4.6).

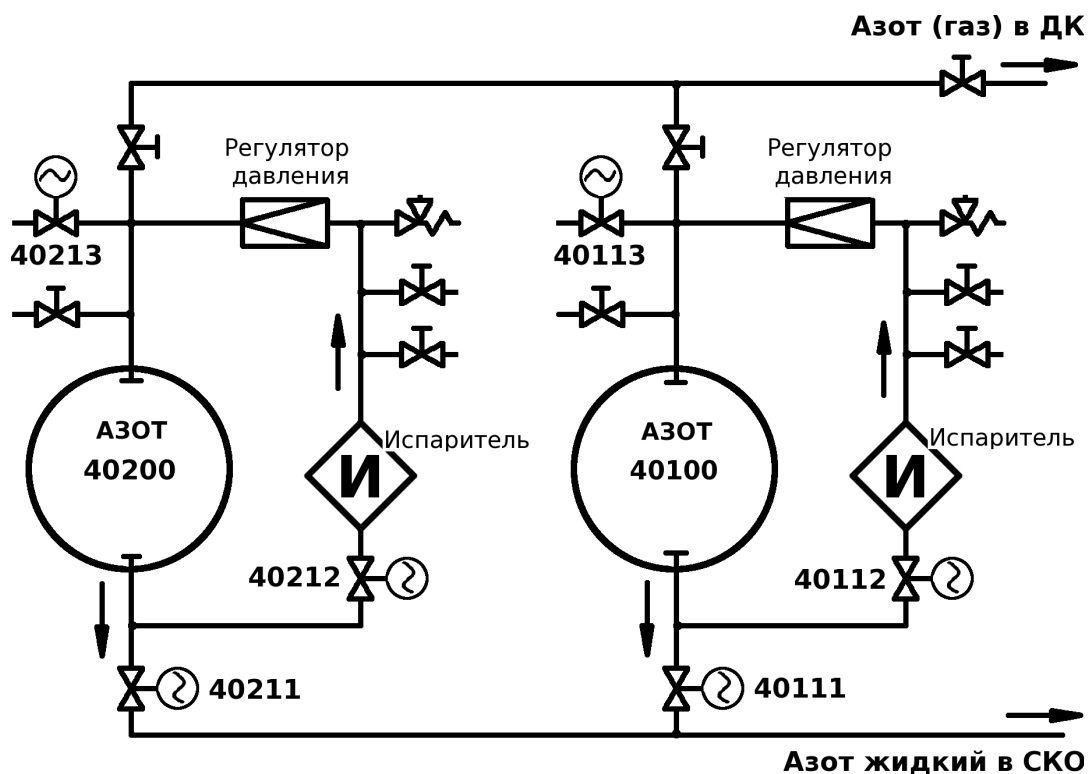
**Таблица 9.** Проектные параметры системы хранения и выдачи криптона  
СХКр-40/0,6

<b>Наименование параметра</b>	<b>Значение параметра</b>
Рабочий продукт	Криптон жидкий
Вспомогательный криоагент	Азот жидкий
Рабочее давление жидкого криптона, МПа	0,6
Рабочая температура жидкого криптона, К	120
Максимальный запас жидкого криптона, кг	46800
Максимальное рабочее давление исходного газообразного криптона, МПа	15
Максимальный темп ожижения криптона (сразу в трёх резервуарах), кг/ч	180
Максимальные суммарные потери жидкого криптона от испарения при отсутствии охлаждения жидким азотом, температуре окружающей среды 293 К (20°C) и атмосферном давлении 0,1 МПа (760 мм.рт.ст.), кг/ч	5
Рекомендуемое остаточное давление в теплоизоляционных полостях резервуаров, Па	$1,33 \cdot 10^{-2}$
Вид управления	ручной, дистанционный

#### 4.4. СХА — система хранения и выдачи жидкого азота

Система хранения и выдачи жидкого азота СХА-150/0,6 (Таблица 10) [68] предназначена для накопления (за счёт привозного), хранения и выдачи в раздаточный коллектор на объекты системы криогенного обеспечения детектора КЕДР жидкого азота, используемого для термостатирования радиационных экранов криогенного оборудования на уровне 80 К и для отвода теплоты конденсации криптона.

Схема включения азотных хранилищ показана на рисунках 4.1, 4.5 и 4.9.



**Рисунок 4.9.** Система хранения и выдачи азота (жидкого и газообразного)

Работа системы СХА построена по незамкнутому технологическому циклу — со сбросом в атмосферу паров азота. Обеспечение объектов жидким и газообразным азотом может осуществляться от одного из попеременно работающих резервуаров-хранилищ жидкого азота в ручном дистанционном режиме. Второе хранилище в это время может заполняться жидким азотом из привозных транспортных цистерн.

В состав СТА входят:

- два резервуара хранилищ жидкого азота (марки РЦВ-63/0,5-1-3-1) вместимостью 66,3 м<sup>3</sup> каждый ;
- два индивидуальных воздушно-азотных теплообменника-испарителя жидкого азота ИА-52 (41И-1, 42И-1) производительностью по 270 м<sup>3</sup>/ч;
- индивидуальные автоматические (механические) регуляторы-задатчики давления;

- криогенный раздаточный коллектор для жидкого азота с запорно-регулирующими устройствами;
- газопроводы с запорными устройствами для системы обдува торцов дрейфовой камеры;
- датчики уровня, давления, вакуума.

**Таблица 10.** Основные параметры СХА-150/0,6

Наименование параметра	Значение параметра
Рабочий продукт	Азот жидкий и газообразный
Рабочее давление азота, МПа	0,5
Рабочая температура жидкого азота, К	80
Рабочая температура газообразного азота, К	220 ÷ 290 (на 20 К ниже температуры окружающей среды)
Максимальная масса жидкого азота, тонн	101,6
Максимальный расход газообразного азота, м <sup>3</sup> /ч	250
Максимальный расход жидкого азота, кг/ч	20000
Потери азота от испарения при давлении в теплоизоляционной полости резервуара не более $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па, температуре окружающей среды 293 К (20°C) и атмосферном давлении 0,1 МПа (760 мм.рт.ст.), кг/ч (%/сутки)	2,2 (0,104)
Вид управления	Ручной, дистанционный

Два резервуара (танка [78]) хранилищ жидкого азота вместимостью по 66,3 м<sup>3</sup> (50800 кг жидкого азота) установлены вертикально на открытой (уличной) площадке, оборудованы системой заправки жидким азотом из транспортных цистерн и индивидуальными блоками испарителей с редуцированными регуляторами-датчиками давления для самонаддува до заданного избыточного давления (0,2 ÷ 0,5 МПа) с целью вытеснения криогенной жидкости в раздаточный коллектор и её транспортирования к объектам криогенной системы детектора КЕДР.



Наличие двух азотных танков позволяет организовать их поочерёдную заправку и, тем самым, обеспечить бесперебойное снабжение жидким азотом потребителей. Общий раздаточный коллектор экономит эксплуатационные затраты жидкого азота. Он соединяет азотные хранилища с каждым криогенным объектом системы обеспечения, поставляя жидкий азот под максимальным избыточным давлением до 0,5 МПа, достаточным для продувки азотом их теплозащитных экранов-змеевиков и работы теплообменников-охладителей.

За счёт блоков самонаддува с испарителями [79] и перестраиваемыми на заданное давление редукторами, изыскана дополнительная возможность использования танков в роли газификаторов без нарушения технологии их эксплуатации. Подвод газообразного азота к системе обдува торцов дрейфовой камеры осуществлён отдельным коллектором (тёплой трубой) с возможностью отбора газа из любого танка переключением запорных клапанов с ручным приводом.

Важной дополнительной функцией азотной системы является обеспечение газификации и долгосрочного непрерывного снабжения чистым газообразным азотом комнатной температуры с массовым расходом потока 0,5 тонны в сутки системы обдува торцов дрейфовой камеры детектора КЕДР с целью минимизации диффузии кислорода из атмосферы в её рабочую газовую смесь на основе диметилэфира, что обеспечивает стабильность параметров дрейфовой камеры.

#### **4.5. Система пневмоуправления**

Система пневмоуправления (Рисунок 4.10, Таблица 12) [69] предназначена для подачи гелия высокого и утилизации низкого давления для распределительных пневмоэлектрических сборок — пневмоцифров,

управляющих работой окончных исполнительных криогенных двухпозиционных клапанов с пневматическим приводом.

Управление исполнительными электропневматическими устройствами, размещёнными в пневмоцилиндрах, происходит дистанционно.

В системе установлены криогенные пневмоклапаны двух видов: двухпозиционные и регулируемые. В зависимости от типа, они управляются газообразным гелием высокого давления: 4,7 МПа (двухпозиционные), или 2,5 МПа (регулируемые).

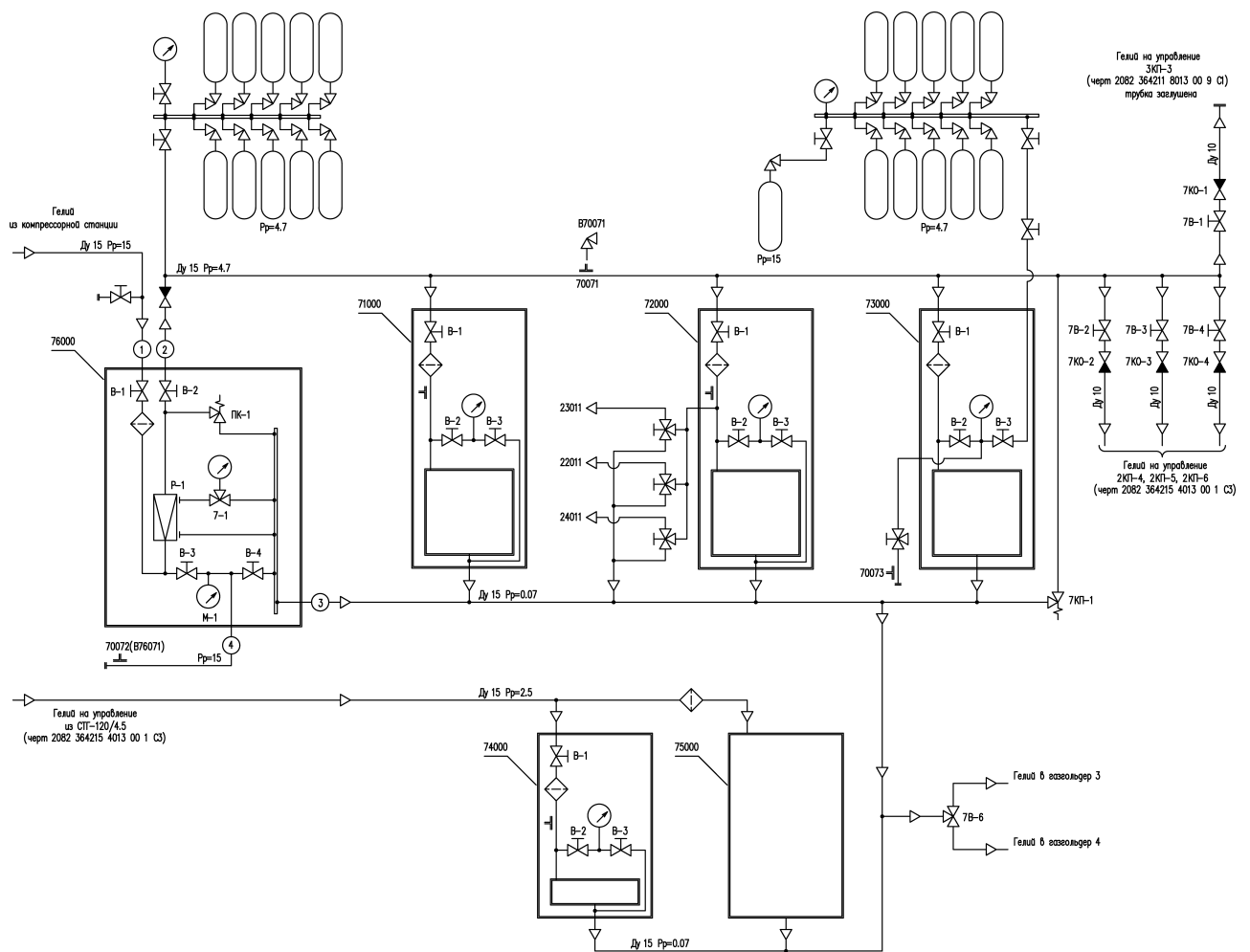
В нормальном состоянии (без подачи запирающего давления в импульсную трубку пневмоклапана) пневмоклапан открыт под действием встроенной пружины.

Закрывание пневмоклапана происходит по мере поступления в его импульсную трубку управляющего давления газа.

Для регулируемых пневмоклапанов предусмотрена схема с редуцирующим управлением: управляющее давление газа в диапазоне от 0 до 1,9 МПа подаётся через редуктор с электромеханическим приводом, управляемым дистанционно. В конечном положении закрытия клапана, на него подаётся одномоментно полное запирающее давление газа (2,5 МПа) через электропневмоклапан.

**Таблица 12.** Параметры системы пневмоуправления

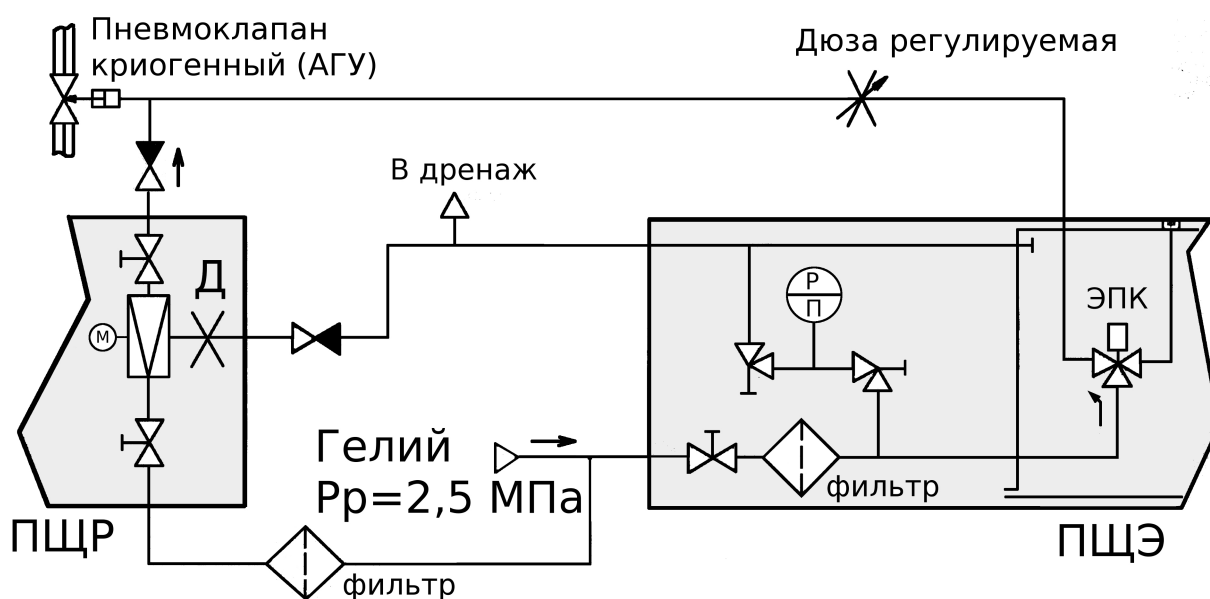
Наименование параметра	Значение параметра
Управляющий газ	Гелий
Давление входное/выходное управления пневмоклапанами рефрижератора, МПа	2,5/2,5
Давление входное/выходное управления пневмоклапанами, МПа	$7 \div 15 / 4,7 \pm 0,3$
Давление гелия в дренажном трубопроводе, МПа	0,07
Напряжение электропитания пневмопереключателей, постоянное, В	27 (20 ÷ 30)
Напряжение электропитания пневморедукторов, переменное, В	127 (220)



**Рисунок 4.10.** Система пневмоуправления

Электропневмоклапаны (ЭПК) имеют электромагнитный привод. Они размещаются в пневмоцитах (ПЦ) группами по 15 штук. Их функция заключается в одномоментной подаче или сбросе в дренаж полного управляющего давления газа в(из) импульсной трубки пневмоклапана.

Подача (сброс) управляющего давления газа на двухпозиционные клапаны происходит через ЭПК — одномоментно. Типичная схема включения пневмоклапанов приведена на рисунке 4.11.



**Рисунок 4.11.** Схема включения нормально закрытого регулируемого пневмоклапана (Д — дюза, ПЩЭ — пневмоцил электропневмоклапанов ЭПК, ПЩР — пневмоцил редукторов)

#### 4.6. Криогенная станция

На криогенной станции (Рисунок 4.16, Таблица 13) размещается оборудование [70], обеспечивающее работу гелиевой системы детектора КЕДР.

Криогенная станция отдалена от детектора на  $\sim 600$  метров и связана с СКО трубопроводами подачи высокого (до 15 МПа — диаметром 25 мм) и утилизации низкого (до 0,07 МПа — диаметрами 250 мм и 100 мм) давления гелия с температурой окружающей среды.

К оборудованию криогенной станции, обеспечивающему работу СТГ, относятся:

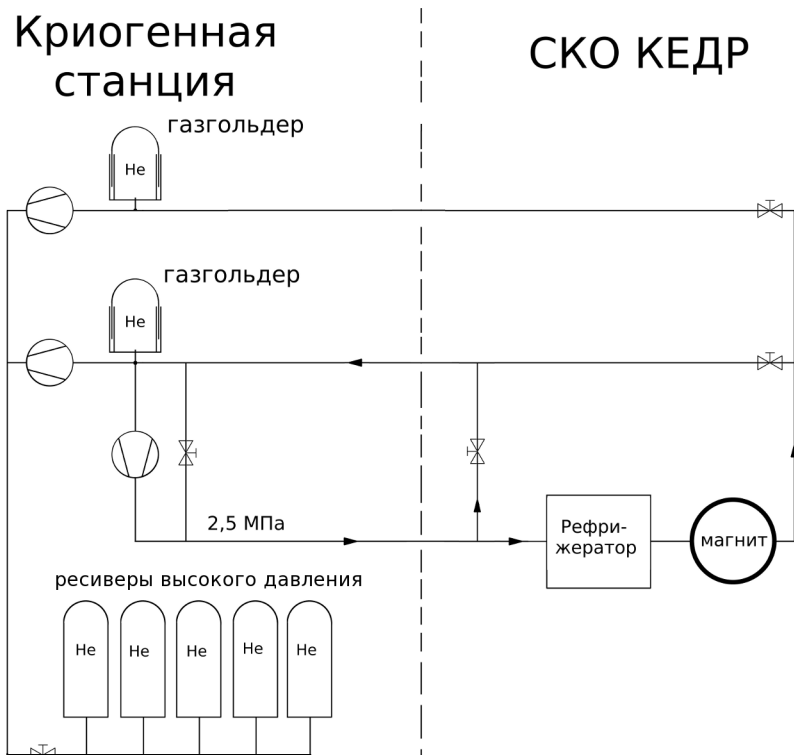
- ожижители гелия;
- гелиевые компрессоры: оборотного гелия среднего давления (2,5 МПа) с массовым расходом до 200 кг/ч и управляющего гелия высокого давления (до 15 МПа) с массовым расходом 7 кг/ч;

- азотные блоки криогенной очистки потоков газообразного гелия;
- сборники газообразного гелия — масляные газгольдеры ( $2 \times 20 \text{ м}^3$ );
- накопители газообразного гелия — ресиверы ( $6 \times 80 \text{ м}^3$ );
- вакуумные ресиверы Р-175/0,07 экстренного приёма паров гелия с рабочим давлением 0,165 МПа ( $2 \times 175 \text{ м}^3$ );
- газопроводы гелия низкого (до 0,07 МПа) и высокого (до 15 МПа) давления;
- вспомогательные вакуумные агрегаты (агрегат вакуумный золотниковый АВЗ-63Д и другие);
- трубопроводы, арматура, датчики технологических параметров.

**Таблица 13.** Параметры оборудования криогенной станции

Наименование параметра	Значение параметра
Рабочий продукт	Гелий жидкий и газообразный (марки А по ТУ 51-940-80)
Производительность по жидкому гелию, л/ч	100 ÷ 200
Рабочее давление (производительность) компрессора рефрижератора, МПа (кг/ч)	2,5 (200)
Рабочее давление (производительность) компрессора пневмоуправления, МПа	7 ÷ 15 (7 ÷ 8 кг/ч)
Количество вакуумных ресиверов, штук	2
Вместимость резервуара вакуумного ресивера, м <sup>3</sup>	175
Рабочее абсолютное давление вакуумного ресивера, Па	$1 \cdot 10^2 \div 1,65 \cdot 10^5$
Рабочая температура, К (°С)	233 ÷ 323 (-40 ÷ +50)

На криогенной станции установлены гелиевые ожижители, производящие жидкий гелий для стартового охлаждения и заполнения криостатов и накопителей, а также для пополнения запасов гелиевой криогенной системы детектора КЕДР.



**Рисунок 4.12.** Технологические связи криогенной станции и криокомплекса детектора КЕДР

Произведённый на криогенной станции жидкий гелий доставляется автотранспортом для временного хранения и заправки в оборудование детектора КЕДР в нескольких транспортных дьюарах различной вместимости: 250 л, 450 л и 500 л. Сосуды сосредотачиваются на двух площадках, приспособленных для одновременного размещения и подключения к сборному коллектору паров гелия группами по шесть и пять сосудов соответственно. Для перемещения сосудов между площадками требуется привлечение мостового погрузочного крана.

Единовременно необходимым запасом для начала работы гелиевой системы детектора КЕДР является  $2,5 \div 3,0 \text{ м}^3$  жидкого гелия, расходуемого на охлаждение и заполнение криостатов и трубопроводов сверхпроводящих магнитов, а также запуска в работу гелиевого рефрижератора и блока питания

ТОКОВЫХ ВВОДОВ.

На криогенной станции расположено компрессорное оборудование для непрерывного производства потока гелия среднего давления с большим массовым расходом (2,5 МПа, до 200 кг/ч) для обеспечения работы гелиевого рефрижератора, а также периодического пополнения запаса гелия высокого давления (до 15 МПа) в демпферном ресивере (10 баллонов × 40 л) системы пневмоуправления.

Необходимым условием работы гелиевой криосистемы детектора КЕДР является использование чистого гелия — марки А по ТУ 51-940-80. Чтобы избавиться гелий, поступающий от компрессоров, от паров масла, воды и прочих загрязнителей, в том числе мелкодисперсионной взвеси пылевых частиц, после компрессоров установлены регенерируемые фильтры криогенной очистки. Хладагентом для них является жидкий азот.

Перед ответственными узлами гелиевой системы установлены дополнительные фильтры очистки гелия [80], [81].

## Глава 5. Аппаратное обеспечение дистанционного управления

### 5.1. Телеметрия и контроль

Информационное сопровождение криогенной системы детектора КЕДР строится на использовании электронных средств телеметрии, контроля, видеонаблюдения и аудиосигнализации.

Устройства сбора первичной информации встроены в криогенное оборудование, в исполнительные устройства и сопряжённые с ними специализированные электронные преобразователи [82], [83], [84].

Электрические параметры первичных устройств контролируются электронными модулями, собранными в конструктивах КАМАК. Управление информационным обменом с аппаратурой КАМАК осуществляет ЭВМ программно.

Каждая группа модулей КАМАК устанавливается в стыковочном узле — так называемом крейте КАМАК, объединяющем общей магистралью информационного обмена до 25 модулей.

Задействованная аппаратура КАМАК сгруппирована в четырёх крейтах вблизи обслуживаемого их электроникой оборудования.

Два крейта интегрированы в радиостойку управления исполнительными устройствами. Один из них вмещает в себя модули сборщиков двоичных состояний, определяющих промежуточное положение клапанов и пороговых сигнализаторов, другой — модули выходных регистров, являющихся ключами электропривода исполнительных устройств.

Ещё один крейт в расположенной по соседству радиостойке обслуживает измерительные цепи датчиков, в том числе датчиков промежуточного положения регулирующих исполнительных устройств.

Один крейт вынесен на площадку вблизи детектора. В нём собрана



измерительная аппаратура, обслуживающая датчики внутри криогенных криостатов детектора. За счёт приближения крейта к месту компактного расположения датчиков уменьшена длина соответствующих сигнальных линий, что улучшает их помехозащищённость.

Состав номенклатуры блоков КАМАК для информационного обеспечения криогенного сопровождения включает:

- АЦПИ-20 (Ц0609) — прецизионный АЦП интегрирующего типа;
- КАС-128Г (А0603) — коммутатор аналоговых сигналов;
- АЦП-101S (Ц0616) — цифровой осциллограф;
- СДС (Р0610) — сборщик двоичных состояний;
- 5ДГТ10 (спецразработка) — генератор тока для криотермодатчиков;
- ИП КРИОС (спецразработка) — простейший источник питания.

Для датчиков контроля промежуточного положения исполнительных регулирующих устройств применяется четырёхканальный блок питания в конструктиве ВИШНЯ:

- БП  $2 \times 5$  В,  $2 \times 24$  В (1 А);

Основой измерительного тракта большинства метрологических схем является прецизионный АЦП интегрирующего типа АЦПИ-20 в конструктиве КАМАК. Он способен оцифровывать сигналы в диапазоне до 0,5 В с дискретностью от 1 мкВ, либо до 8 В с дискретностью от 16 мкВ.

Эффективное использование этого прибора обеспечивает мультиплексирование его единственного измерительного канала с помощью коммутатора аналоговых сигналов.

Для этого используется коммутатор КАС-128Г, на герконовых реле, в двупроводном режиме мультиплексирования: коммутирования одного из 64 входных каналов на один выходной. Номер канала программируется с магистрали КАМАК. Есть возможность отключать мультиплексированный выход коммутатора (переводить в высокоимпедансное состояние), что

позволяет непосредственно объединять выходы нескольких коммутаторов. Это приводит к пропорциональному увеличению количества каналов такого составного мультиплексора.

В работе также задействован цифровой осциллограф — АЦП со встроенной оперативной памятью и внешней синхронизацией измерений (СТАРТ / СТОП) АЦП-101S. С его помощью может производиться оцифровка сигналов с предусилителя пьезодатчика пульсаций давления, установленного в поршневом детандере. Каждое измерение синхронизируется с поворотом маховика поршневого детандера на один градус, результат сохраняется в памяти АЦП до окончания 360 измерений, соответствующего полному обороту маховика. Затем АЦП выставляет на магистраль КАМАК сигнал LAM (англ.) и по инициативе ЭВМ передаёт ей весь кадр накопленных отсчётов. По ним строится индикаторная PV-диаграмма (осциллограмма «давление-объём»), отражающая детали работы детандера и позволяющая корректировать его работу.

На основе коммутатора КАС-128Г, а также программируемого генератора постоянного тока 5ДГТ10, содержащего ЦАП, построена схема питания датчиков (первичных преобразователей) температуры. Коммутатор используется как демультимплексор, переключая общий канал на любой из 64 каналов. Генератор тока подключается к общему каналу коммутатора, составляя таким образом ЦАП-демультимплексор.

В каждый момент времени одновременно коммутируются канал ЦАП-демультимплексора и канал АЦП-мультиплексора, соответствующие выводам питания и измерения одного из подключённых к ним датчиков. Таким образом, подача тока питания на датчик и оцифровка его измерительного сигнала ограничены во времени. Благодаря этому снижается нежелательный нагрев криогенного термодатчика.

Генератор тока 5ДГТ10 выдаёт постоянный ток от 1 мкА до 10 мА,

соответствующий 10-разрядному значению в программируемом (с магистрали КАМАК) регистре, в одном из 5 диапазонов, отличающихся величинами максимального выходного тока. Универсальность этого прибора в том, что он позволяет обслуживать как платиновые термосопротивления, используемые в диапазоне температур от 300 К до 20 К, так и полупроводниковые термопреобразователи, работающие в диапазоне от 60 К (40 К) до 4 К (и ниже). Последние требуют коррекции режима питания в зависимости от измеряемой температуры, исходя из обеспечения постоянства выделяемой мощности и учёта резкого изменения сопротивления полупроводника с температурой.

Основным модулем контроля дискретных сигнализаторов типа «сухой контакт» служит модуль КАМАК сбора двоичных состояний (СДС). Этот тип контактов присутствует в качестве сигнализаторов крайних или выделенных промежуточных положений исполнительных устройств и пороговых датчиков давления в рассматриваемой системе. Имеющиеся в блоке 16 независимых двупроводных каналов с гальванической развязкой фиксируют изменение состояния 16 контролируемых контактов во входном регистре. На каждое изменение выдаётся КАМАК-сигнал готовности LAM (от англ. Look At Me), который можно использовать для аппаратного прерывания ЭВМ.

Измеряются и контролируются следующие параметры компонентов криогенной системы детектора КЕДР:

- температура (поверхностей, потоков),
- давление (абсолютное, избыточное, дифференциальное, пороговое, пульсаций),
- частота вращения (привода детандера),
- уровень (криожидкостей),
- расход (газа),
- смещение (основного СП магнита внутри криостата),
- положение регуляторов (промежуточные, крайние).

### 5.1.1. Измерение температуры

Для контроля температуры (Т) применяются термопреобразователи сопротивления платиновые со стандартной градуировочной характеристикой и полупроводниковые — с индивидуальными калибровочными характеристиками.

Для определения температуры по платиновым термопреобразователям сопротивления используются стандартные таблицы:  $W_{100}=1,3910$  по ГОСТ 6651-84 в диапазоне температур от 273,15 К до 400 К;  $W_{СТ}$  по ГОСТ 8.157-75 с индивидуальными — из паспорта датчика — поправками  $\Delta W$  при 15 К, 20 К, 25 К, 33 К, 43 К, 77 К, 93 К в диапазоне температур от 15 К до 273,15 К.

Определение температуры по измеренному сопротивлению R полупроводникового датчика осуществляется с использованием полинома вида:

$$T = A_0 + R \cdot (A_1 + R \cdot (A_2 + R \cdot (A_3 + R \cdot A_4))),$$

где  $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4$  — индивидуальные коэффициенты, приводимые в паспорте датчика.

Для контроля температуры поверхностей криостатов применены датчики с тонкостенным цилиндрическим корпусом ТСП-4054. Для измерений в потоке жидкости — с удлинённым, более прочным цилиндрическим корпусом ТСП-4054-2.

Криогенная система оборудована полупроводниковыми термопреобразователями двух типов: для измерений от 60 К до 4 К — ТПК-620А, от 40 К до 4 К — ТПК-720А.

Для термометрии в гелиевых трубопроводах датчики установлены попарно: платиновый и полупроводниковый вместе. Это обеспечивает контроль

как в режиме работы с жидким гелием, так и в режиме захолаживания оборудования.

Электрическая схема термопреобразователей выполнена по четырёхпроводной схеме — попарно свитыми проводниками — питания и измерения. Для снижения уровня электромагнитных помех провода помещены в общий экран с наружной электроизоляцией.

Аппаратура термоконтроля изготовлена в конструктиве КАМАК. Используется многоканальное подключение термосопротивлений к АЦПИ-20 и генератору тока 5ДГТ10, используя коммутаторы аналоговых сигналов КАС-128Г в режимах мультиплексора и демультимплексора. Канал ЦАП-демультимплексора имеет тот же номер, что и канал АЦП-мультиплексора, что упрощает программирование коммутаторов и наладку измерительных трактов.

### 5.1.2. Измерение давления

Для измерения давления, в основном, применяются тензопреобразователи сопротивления с чувствительным элементом со структурой кремний на сапфире, располагаемой на мембране датчика давления. Под действием давления, приложенного к мембране, она изгибается и передаёт механическое напряжение на чувствительный тензоэлемент.

Использованы датчики промышленного исполнения следующих модификаций:

- Сапфир-22М-ДА — для измерения абсолютного давления,
- Сапфир-22М-ДИ — для измерения избыточного давления,
- Сапфир-22М-ДД — для измерения дифференциального (перепада) давления,
- КРИОС-ДА — для измерения абсолютного давления.

Отличие преобразователей САПФИР от преобразователей КРИОС заключается в том, что последние предназначены для внутреннего монтажа в криогенное оборудование. Кроме того, электронный блок датчиков САПФИР выдаёт линейно меняющийся с давлением сигнал.

Датчики (измерители) абсолютного давления КРИОС-ДА, вмонтированные в гелиевую систему, работают при криогенных температурах. Известно, что они имеют нелинейную зависимость рабочей характеристики от температуры в криогенном диапазоне. Из-за утери индивидуально настроенных блоков измерения (вторичных преобразователей), эти датчики были грубо прокалиброваны прямо в установке, в нескольких точках, при фиксированной температуре. Поэтому они используются, в основном, для наблюдения за динамикой давления.

Давление на датчики САПФИР подаётся от точек контроля (мест отбора газа) посредством длинных импульсных трубок. Это позволяет располагать датчики вдали от криогенной системы. Погрешность измерения давления не превышает 0,5 % от диапазона измерения, выходной сигнал — токовый — от 4 мА до 20 мА.

Для измерения тензосопротивления на датчик типа САПФИР подаётся постоянный ток от блока питания напряжением 36 В. Применяется восьмиканальный блок питания с гальванической развязкой каналов, обслуживающий до восьми независимых датчиков. Для датчиков типа КРИОС используется источник питания собственного изготовления — модуль в стандарте КАМАК. Измерительная схема основана на использовании модулей КАМАК: многоканального коммутатора аналоговых сигналов КАС-128Г и прецизионного АЦП марки АЦПИИ-20. К блоку питания каждый датчик давления подключается последовательно с нагрузочным термостабильным (проволочным) резистором (типа С2-29, отечественного изготовления), на котором измеряется падение напряжения.

Также используется электронный датчик типа БД модели ПД-Р, производства компании ВД (Индия-Россия). Выходной сигнал, погрешность измерений и схема включения аналогична датчикам САПФИР. Датчик БД подключается к одному из восьми каналов программируемого контроллера промышленного стандарта типа ОВЕН, установленного на Криогенной станции. Он управляет электромеханическими клапанами, задействуемыми при переключении сброса паров гелия из системы детектора в предварительно отвакуумированные сосуды (ресиверы), вместо штатного сборника (газгольдера). По этому датчику избыточного давления настраиваются пороги активации ( $P > 0,05$  МПа) и дезактивации ( $P < 0,02$  МПа) этого режима.

Измерение пульсаций давления в поршневом детандере контролируется по пьезодатчику типа ЛХ-604. Предусилитель его сигнала связан с контроллером детандера, выполняющим оцифровку сигнала и передачу в ЭВМ.

Кроме электронных датчиков давления, в системе установлены электроконтактные манометры и мановакуумметры, а также различные манометры без электрического оснащения.

**Таблица 14. Датчики давления**

Наименование прибора	Тип давления
Сапфир-22М-ДА	Абсолютное
Сапфир-22М-ДИ	Избыточное
Сапфир-22М-ДД	Дифференциальное (перепад)
Криос-ДА	Абсолютное
БД ПД-Р	Избыточное
ЛХ-604	Пульсации
ЭКМ	Избыточное
ЭКМВ	Абсолютное

Всего в системе задействовано датчиками давления: 48 каналов

САПФИР, 6 каналов КРИОС, 1 канал БД, 3 канала ЭКМВ, 1 канал ЭКМ, 1 канал ЛХ. Параметры задействованных датчиков давления приведены в таблице 14.

Перевод измеренного ( $I$ , [мА]) линейно изменяющегося значения электрического сигнала датчика в значение величины параметра ( $P$ , [МПа]) осуществляется масштабированием по формуле:

$$P = P_{\text{MIN}} + (P_{\text{MAX}} - P_{\text{MIN}}) \cdot (I - I_{\text{MIN}}) / (I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}),$$

где  $P_{\text{MAX}}$ ,  $P_{\text{MIN}}$  — максимальное и минимальное значения величины давления в диапазоне измерения датчика, [МПа];

$I$ ,  $I_{\text{MIN}}$ ,  $I_{\text{MAX}}$  — измеренное, минимальное и максимальное значения тока (сигнала) в диапазоне измерения датчика, [мА].

### 5.1.3. Измерение уровня

Для измерения уровня криогенных жидкостей использованы дифференциальные тензопреобразователи САПФИР-22М-ДД и проволочные сверхпроводящие уровнемеры жидкого гелия собственного и промышленного (КРУС-1У) изготовления.

Датчик перепада давления ( $\Delta P$ ) измеряет разницу давлений внизу ( $P_{\text{низ}}$ ) и верху ( $P_{\text{верх}}$ ) сосуда с жидкостью:

$$\Delta P = P_{\text{низ}} - P_{\text{верх}}$$

Давление над жидкостью ( $P_{\text{верх}}$ ) определяется давлением газа (паров) ( $P_{\text{газ}}$ ):



$$P_{\text{верх}} = P_{\text{газ}}$$

Давление на дне сосуда с жидкостью ( $P_{\text{низ}}$ ) определяется давлением столба жидкости ( $P_{\text{жидк}}$ ) и давлением газа (паров) над жидкостью ( $P_{\text{газ}}$ ):

$$P_{\text{низ}} = P_{\text{газ}} + P_{\text{жидк}}$$

Очевидно, перепад давлений определяется давлением столба жидкости:

$$\Delta P = P_{\text{жидк}}$$

По перепаду ( $\Delta P$ , [Па]) давлений и плотности ( $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>]) жидкости, согласно закону Архимеда ( $g = 9,8$  [м/с<sup>2</sup>]), вычисляется высота ( $h$ , [м]) столба жидкости:

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h$$

$$h = \Delta P / (\rho \cdot g)$$

Для измерения уровня жидкого гелия используются уровнемеры, изготовленные из отрезка сверхпроводящей проволоки. При погружении в сосуд с жидким гелием участок проволоки, смоченный жидким гелием, становится сверхпроводящим, и сопротивление проволоки уровнемера уменьшается. С уменьшением высоты столба жидкости проволока переходит в нормальное состояние, и сопротивление уровнемера возрастает. (Для лучшей чувствительности сверхпроводящей проволоки на границе раздела фаз гелия (газ / жидкость) в уровнемер собственного изготовления встроен миниатюрный нагреватель из тонкой несверхпроводящей проволоки.)

Применяются сверхпроводящие уровнемеры заводского изготовления КРУС-1У с диапазоном измерения 0,4 м и 1,0 м.

Сверхпроводящие уровнемеры (разработка ИЯФ СО РАН) с диапазоном измерения  $\sim 1$  м, применяемые в системе, встроены в транспортные сосуды жидкого гелия.

Всего используется 2 канала КРУС 0,4 м и 2 канала КРУС 1,0 м, 1 канал самодельных уровнемеров, 8 каналов САПФИР-22М-ДД.

#### 5.1.4. Измерение расхода

В системе измеряется расход газообразного гелия в потоке сжатого газа и газа низкого давления, связанных с работой гелиевого рефрижератора.

Для измерения расхода применяются датчики САПФИР-22М-ДД перепада давления потока газа на калиброванном сужающем отверстии, выполненным в виде диафрагмы (шайбы) с калиброванным сквозным отверстием.

Измерительные диафрагмы устанавливаются на прямолинейном участке трубопроводов для обеспечения ламинарного характера течения газа.

Преобразование измеренного аналогового сигнала ( $I$ , [мА]) первичного преобразователя САПФИР-22М-ДД при определении расхода ( $G$ , [кг/ч]) осуществляется по формуле:

$$G = G_{\text{MAX}} \cdot ((I - I_{\text{MIN}})(I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}))^{\frac{1}{2}},$$

где  $G_{\text{MAX}}$  — конечное значение диапазона измерения расхода, [кг/ч];

$I_{\text{MAX}}$ ,  $I_{\text{MIN}}$  — максимальное и минимальное значения диапазона изменения выходного сигнала преобразователя, [мА].

Измеренное значение расхода ( $G$ , [кг/ч]) требует корректировки по

текущим значениям температуры ( $T$ , [K]) и давления ( $P$ , [МПа]) рабочей среды в месте установки диафрагмы:

$$G_K = G \cdot K_0 \cdot ((P + 0,1) / T)^{1/2},$$

$$K_0 = (T_0 / P_0)^{1/2},$$

где  $T_0$ ,  $P_0$  — значения температуры ([K]) и давления ([МПа]), при которых производился расчёт сужающего устройства.

Корректировка только по одному из параметров — температуре или давлению — осуществляется по одной из формул:

$$G_K = G \cdot (T_0 / T)^{1/2}$$

$$G_K = G \cdot ((P + 0,1) / P_0)^{1/2}$$

Всего задействовано 2 канала измерения расхода.

### 5.1.5. Измерение перемещений

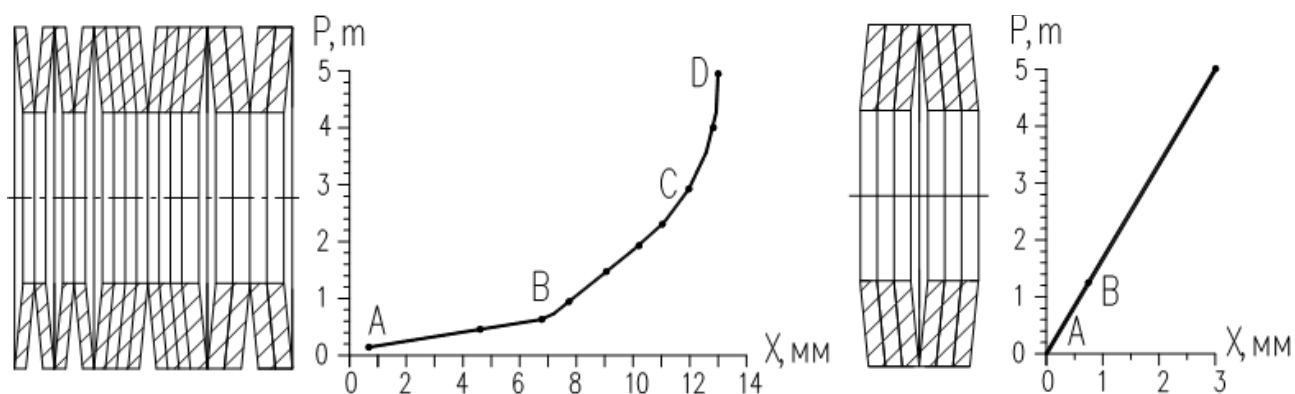
Важной задачей при размещении основного магнита детектора внутри своего криостата явилось равномерное натяжение пружинных амортизаторов поддерживающих его тяг (цилиндрических стержней).

Для контроля степени натяжения по величине деформации пружинных блоков амортизаторов были разработаны датчики положения (ДП) телескопической конструкции. Они измеряют линейное смещение до 10 мм, или до 16 мм: ДП-10 и ДП-16. Пересчёт линейной деформации блока пружин в действующую на них силу натяжения производится по нагрузочной

калибровочной характеристике, предварительно полученной на стенде.

На каждом пружинном блоке установлено по одному датчику. Как пружинные блоки, так и их датчики работают в условиях вакуума.

На рисунке 5.1 показаны приведённые (без так называемых петель гистерезиса) калибровочные характеристики пружинных блоков тарельчатых пружин используемых конфигураций.



**Рисунок 5.1.** Приведённые калибровочные нагрузочные (в тоннах) характеристики при деформации пружинных блоков для горизонтальных (слева) и поперечных (справа) тяг

Натяжение пружинных блоков производилось с применением этих датчиков на этапе сборки криостата основного сверхпроводящего магнита. В процессе эксплуатации свободного доступа к средствам коррекции натяжения нет, но сигналы с датчиков могут быть использованы для контроля равномерности нагрузок на систему подвески магнита в криостате.

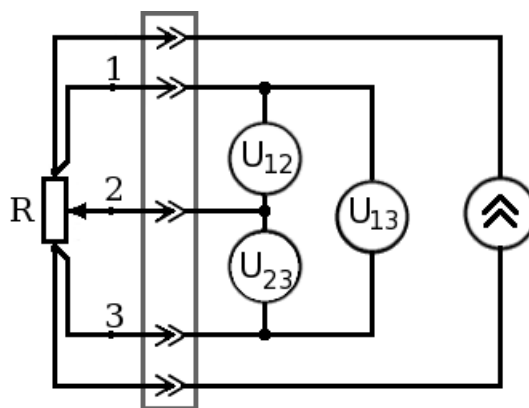
Кроме контроля нагрузок, датчики положений описываемой конструкции применяются для постоянного контроля положения сверхпроводящей катушки (точнее, внутреннего гелиевого сосуда с впаянной в него сверхпроводящей катушкой) относительно внешнего корпуса своего криостата в процессе эксплуатации. Измеряемой величиной является линейное смещение

относительно выбранного первоначального положения, соответствующего отсутствию термических, магнитных и весовых нагрузок на конструкцию — при комнатной температуре и нормальном давлении.

Датчики смещений установлены внутри криогенных труб криостата — для контроля смещения в ортогональных направлениях координатного базиса. Для размещения датчика, имеющего заметную габаритную длину, внутри криогенного трубопровода — в вакуумируемом зазоре между внутренней и внешней трубами — применены блоки дифференциальной передачи. Блок состоит из связки двух шкивов (цилиндров) разного диаметра, поверх которых намотана стекловолоконная нить. Нить, закреплённая на одной из труб, связана через дифференциальный блок с датчиком, закреплённым на другой трубе. Благодаря пружинному возвратному механизму датчика, нить находится под постоянным натяжением.

Датчики обеспечивают абсолютную погрешность измерения 0,1 мм и чувствительность 0,01 мм.

Электрическая схема включения датчиков приведена на рисунке 5.2.



**Рисунок 5.2.** Схема подключения и контроля напряжений ( $U$ ) датчика перемещений ( $R$ )

Ток питания датчиков перемещения — 0,1 А. Цепи питания датчиков

сгруппированы при последовательном подключении в две группы — для удобства подключения к детектору с противоположных сторон. Максимальное напряжение источника питания ограничено значением 5 В, выбранным во избежание электрических пробоев в вакууме. Сопротивление отрезка манганиновой проволоки, являющейся чувствительным элементом датчика смещения, составляет 0,27 Ом.

Для контроля надёжности подпружиненного контакта ползунка, скользящего по чувствительному элементу, осуществляется тоекратное измерение сигналов с датчика — по одному ( $U_1$  и  $U_2$ ) с каждого из плеч (участки электрической цепи между ползунком и каждым из концов чувствительной проволоки), и полное напряжение ( $U$ ) на чувствительном элементе. При этом должно выполняться равенство, следующее закону Ома:

$$U = |U_1| + |U_2| .$$

В случае нарушения равенства датчик признаётся неисправным.

Относительное смещение ( $L_1$ ) вычисляется для одного из плеч (например, 1) датчика по формуле:

$$L_1 = |U_1| / U .$$

Абсолютное смещение ( $X$ , мм) определяется по относительному смещению, полному сопротивлению ( $R$ , Ом) и калибровочной характеристике  $f_x(R)$  датчика:

$$X = f_x( R \cdot L_1 ) .$$

Всего используется 12 каналов контроля смещения и 16 каналов

контроля усилий.

### 5.1.6. Измерение частоты оборотов

Для задания временных интервалов циклограммы коммутации электромагнитных клапанов поршневого детандера используется координатный датчик угловых отсчётов ДЦ-90 (разработка ИФВЭ, г. Москва). С его помощью измеряется также частота вращения маховика детандера.

Датчик за каждый оборот маховика выдаёт две серии импульсов (соответствующие логическим уровням TTL), смещённые по времени на четверть периода для возможности диагностики нарушения направления вращения. Каждый импульс соответствует повороту на один градус. Дополнительный одиночный импульс за каждый оборот выдаётся для мечения начала подсчёта угловых импульсов (нулевой рабочий объём под поршнем) и для определения частоты оборотов.

Датчик неподвижно крепится на корпусе детандера. Подвижная ось датчика соосно жёстко связывается с маховиком детандера. Поэтому поворот маховика на один полный оборот соответствует полному циклу хода поршня — его перемещению от нижней точки останова (нулевой объём газа под поршнем в цилиндре) до верхней (максимальный объём газа под поршнем), и обратно.

Маркер начала отсчёта выставляется в соответствие нижнему предельному положению поршня детандера, при котором объём газа под поршнем равен нулю.

Измерение частоты вращения маховика по импульсам датчика возлагается на электронику, управляющую работой детандера.

### 5.1.7. Контроль положения регуляторов

Датчики промежуточного положения регулирующих исполнительных устройств являются датчиками резистивного типа. Они имеют подвижный контакт, скользящий по виткам встроенного проволочного резистора при регулировании. В применяемых азотных клапанах датчик положения связан с редуктором электропривода и доступен для обслуживания. В регулируемых пневмоклапанах датчик положения связан непосредственно с регулятором внутри криогенного корпуса клапана, поэтому является необслуживаемым.

Для питания последовательно включенных датчиков положения азотных клапанов используется четыре канала двух одинаковых четырёхканальных (5 В, 5 В, 24 В, 24 В) блоков стабилизированного напряжения 24 В постоянного тока (до 1 А), разработанных в конструктиве ВИШНЯ. Таким образом, суммарная нагрузочная способность составного блока питания 24 В — 4 А.

Определение промежуточного положения ( $L$ , [%]) регулятора — степени открытия или закрытия исполнительного устройства — осуществляется по измеренным сопротивлениям, соответствующих текущему положению регулятора ( $R$ , [Ом]), а также положениям полного открытия ( $R_0$ , [Ом]) и полного закрытия ( $R_3$ , [Ом]), по формуле:

$$L = |(R - R_x) / (R_0 - R_3)| \cdot 100 ,$$

где  $R_x = R_0$ , или  $R_x = R_3$ .

### 5.1.8. Контроль пороговых состояний

Для сбора информации о состоянии исполнительных устройств,



не имеющих встроенного датчика промежуточного положения регулирующего привода, используются сигнализаторы фиксированных положений. Это кнопочные замыкатели типа «сухой контакт». При нажатии или отпускании кнопки контакт изменяет своё состояние на противоположное.

Кроме исполнительных устройств, сигнализаторами подобного типа наделены пороговые датчики давления 2С-40 и 2С-25. Вторая цифра в маркировке обозначает порог давления (в атмосферах). При воздействии на пружинный механизм датчика давлением газа определённой величины контакт сигнализатора размыкается. При уменьшении давления ниже порогового значения контакт восстанавливается.

Сбор информации с датчиков положений и порогового давления осуществляется модулями КАМАК — так называемыми сборщиками двоичных состояний, или СДС. Они имеют 16 независимых каналов контроля с гальванической развязкой. Каждый канал способен контролировать сигнальную цепь с датчиком типа «сухой контакт», благодаря выдачи в неё тока до 10 мА от встроенных источников тока и регистрации изменения состояний в цепи в 16-разрядных регистрах. При изменении состояния канала блок запоминает это в одном из регистров и сигнализирует о наличии изменений своему контроллеру.

Всего насчитывается до 80 каналов 2С-40 и 2С-25, свыше 300 каналов контроля положения исполнительных устройств (клапанов).

## 5.2. Дистанционное управление

Дистанционное управление криогенным комплексом базируется на непрерывно программируемых электронных низковольтных модулях КАМАК, сопряжённых с ними высоковольтных блоков в стандарте ВИШНЯ и связанных с ними высоковольтных релейных блоков пуска, защиты и

блокировок электроприводов, а также на встраиваемых автоматических контроллерах.

Электронные приборы управляются центральной ЭВМ, непрерывно осуществляющей дистанционное программирование модулей управления в режиме информационного обмена с ними.

Встраиваемые контроллеры способны работать по собственным алгоритмам, без постоянной связи с центральной ЭВМ. Информационный обмен с ними инициируется ЭВМ с целью коррекции режима автоматической работы, либо с целью получения значений контролируемых ими параметров.

Задействованный состав номенклатуры блоков КАМАК электронного управления включает модули собственного производства на отечественной элементной базе:

- УРР-16 — управляющий регистр 16-канальный, на герконовых реле;
- УР16\*3 — управляющий регистр 16-разрядный, на полупроводниках.

В качестве вспомогательной электроники системы управления использованы блоки в конструктиве ВИШНЯ, собственного изготовления:

- 8ВК220 — коммутатор цепей переменного тока 220 В, 50 Гц;
- БП 2 × 5 В, 2 × 24 В (1 А) — блок питания 4-канальный;
- ИП ПЩ (+ 27 В; 7,5 А) — блок нестабилизированного питания;

Управляющий регистр контролирует 16 выходных ключей в каждом из данных блоков. Блок УРР-16 имеет выходные ключи на герконовых реле. Блок УР16\*3 имеет выходные ключи (ТТЛ) на транзисторах с открытым коллектором. Контакты герконовых реле блока УРР-16 используются для непосредственной коммутации (27 В; 0,5 А) соленоидов электромагнитного привода переключателей управляющего давления двухпозиционных пневмоклапанов криогенной системы.

### 5.2.1. Управление электромеханическими устройствами

Исполнительными устройствами с электромеханическим приводом, использованными в рассматриваемой системе криогенного обеспечения, являются азотные криогенные регулирующие клапаны, а также газовые редукторы регулируемых пневмоклапанов [85].

Управление электродвигателями этих устройств осуществляется посредством схемы пуска, блокировок и защиты на высоковольтных (220 В / 50 Гц переменного тока) реле, электромагнитных пускателях и автоматах ввода питания и защиты от короткого замыкания.

Для дистанционного управления катушками электромагнитных пускателей, обеспечивающих заданное направление вращения электродвигателя, применяются блоки КАМАК УР16\*3.

Управляющий регистр УР16\*3 имеет 16 выходных ключей (ТТЛ) на транзисторах с открытым коллектором, использующихся для сопряжения с входными цепями логического управления (ТТЛ) высоковольтных коммутаторов 8ВК220.

Восьмиканальные коммутаторы 8ВК220 переменного тока 220 В / 50 Гц (до 10 А) с гальванической развязкой цепей управления и нагрузки — на управляемых оптронных тиристорах — разработаны в конструктиве ВИШНЯ специально для управления высоковольтными реле модулей пуска, блокировок и защиты электродвигателей клапанов и редукторов с электромеханическими приводами. Коммутация осуществляется по сигналу логического уровня (ТТЛ) на входе соответствующего управляемого тиристорного ключа коммутатора.

Источником питания (5 В) выходного каскада блока УР16\*3 выступает четырёхканальный (5 В, 5 В, 24 В, 24 В) блок стабилизированного напряжения постоянного тока, разработанный в конструктиве ВИШНЯ.

Объединённые вместе два выходных канала 24 В (1 А) этого блока и два аналогичных канала второго такого же блока служат источником питания последовательно включенных датчиков положения исполнительных регулирующих устройств с электромеханическим приводом.

### 5.2.2. Контроллер поршневого детандера

Контроллер детандера [86] работает совместно с координатным датчиком угловых (с разрешением в 1 градус) отсчётов (ДЦ-90) и датчиком пульсаций давления (ЛХ604) поршневого детандера.

Сигнал с датчика пульсаций давления снимается через предусилитель и оцифровывается в относительных единицах, так как для получения характеристической информации [87] в виде индикаторной  $pV$ -диаграммы (давление-объём) его абсолютная калибровка не требуется.

В оперативной памяти контроллера строится динамично изменяющаяся таблица 360 пар значений координата-давление (по количеству отсчётов в 1 градус за полный оборот маховика детандера или, что то же, за полный цикл хода поршня от нижней точки останова до верхней и обратно). По команде от ЭВМ она передаётся на монитор оператора в виде графика индикаторной  $pV$ -диаграммы (давление-объём). Предварительно, угловые отсчёты хода поршня переводятся из полярных координат ( $\varphi$ ) в линейные ( $X$ ) по формуле:  $X = |1 - \cos \varphi|$ . Объём ( $V$ ) газа под поршнем в цилиндре прямо пропорционален линейному ходу поршня ( $X$ ). Поэтому, из-за отсутствия требования абсолютной калибровки, принимается эквивалентность величин  $X$  и  $V$ :  $V = |1 - \cos \varphi|$ .

В основные функции контроллера детандера входит подсчёт импульсов угловых отсчётов, определение угла поворота маховика (то есть относительной линейной координаты положения поршня) и выдача команд включения и

выключения электромагнитных клапанов, отвечающих за газораспределение в рабочей полости детандера (под поршнем), в том числе — подача (обратного) тока размагничения клапанов.

Параметры настройки режимов работы электромагнитов клапанов контроллера задаются от ЭВМ, индивидуально для каждого электромагнита:

- угол (абсолютная координата) опережения включения;
- угол (абсолютная координата) выключения (отсечки);
- величина тока удержания;
- величина тока размагничения;
- длительность (относительный угол) подачи тока размагничения.

Дополнительно, контроллер осуществляет вычисление частоты вращения маховика, а также сохраняет в памяти индикаторную диаграмму, соответствующую одному обороту маховика, и выдаёт её, либо информацию по настройке режима контроллера, — по запросу ЭВМ.

Кроме того, контроллер способен коммутировать цепи управления внешних реле, связанных с модулем выбора (переключения) скорости вращения вала электродвигателя. Электродвигатель стабилизирует частоту вращения маховика поршневого детандера, выступая либо в роли тормоза (электрогенератора с поршневым приводом от детандера), либо — привода (электромотора).

Таким образом, разработанный контроллер поршневого детандера обеспечивает управление всей электроникой, задействованной для обеспечения работы поршневого детандера.

### 5.2.3. Пневмоуправление

В рассматриваемой системе криогенного обеспечения проектом [85] предусмотрено использование до 45 двухпозиционных клапанов и до 15

регулируемых клапанов с пневматическим приводом.

Подача сжатого газа для запираания клапана, а также его сброс для открытия клапана осуществляется с помощью электромагнитных пневмопереключателей. Они сгруппированы по 15 штук в четырёх герметичных газовых сосудах — пневмоцилиндрах. Три пневмоцилиндра работают при входном давлении сжатого газа 4,7 МПа, а один — 2,5 МПа, в паре со щитом редуционного пневмоуправления.

Щит редуционного управления представляет собой монтажный шкаф, в котором смонтированы 15 редукторов с электромеханическим приводом. Редукторы обеспечивают управление давлением сжатого газа, подаваемого на пневмоклапан. Это позволяет регулировать степень открытия/закрытия пневмоклапана.

Для гарантированного запираания пневмоклапана по достижении редуктором предельного максимального выходного давления (до 1,2 МПа), в паре с ним используется двухпозиционный пневмопереключатель, подающий на запираемый клапан максимальное давление сжатого газа (2,5 МПа).

Управление двухпозиционными пневмоклапанами осуществляется с помощью маломощной электроники КАМАК непосредственно, а редуцирующими — посредством мощных высоковольтных коммутаторов переменного тока и подчинённых им релейных блоков пуска, блокировок и защиты электродвигателей редукторов. Для электропитания группы электромагнитных пневмопереключателей каждого из пневмоцилиндров используется нестабилизированный источник постоянного тока номиналом 27 В, нагрузочной способностью 7,5 А (0,5 А на каждый электромагнит).

Важной задачей, выявившейся в процессе эксплуатации системы, стало обеспечение бесперебойного питания клапанов пневмоуправления. При отключении электроснабжения установки, но при сохранении давления управляющего сжатого газа в системе пневмоуправления, пневмоклапаны

переходят в predetermined (открытое или закрытое) состояние, называемое нормальным и зависящее от схемы подключения пневмоклапана к пневмоцилинду. Таким образом, обеспечивается безопасность криогенного оборудования, однако, резко нарушается текущий технологический режим. На восстановление нормальной работы криогенной системы после таких сбоев может потребоваться много времени и запасов криогенных продуктов. Поэтому так важна защита системы управления от случайных кратковременных отключений.

При решении этой задачи была модернизирована первоначальная схема управления на основе КАМАК-модулей в общем крейте.

Во-первых, каналы электронного управления пневмоклапанами продублировали. Для этого дублирующие модули были размещены в соседнем крейте КАМАК, а их линии управления объединены (по логической схеме «монтажное И») с линиями управления дублируемых блоков. Так была обеспечена возможность обесточивания основной группы КАМАК-модулей управления на период их ремонта или замены соседних модулей — без нарушения режимов работы криогенной системы.

Во-вторых, создали резервное электропитание модулей управления на основе аккумуляторных батарей.

В перспективе, на замену КАМАК-блокам управления рассматриваются встраиваемые сторонние контроллеры серийного изготовления на основе микропроцессоров. Это модули ADAM двух типов: 16-канальные контроллеры (ADAM-4051) датчиков типа «сухой контакт» и 8-канальные управляющие релейные контроллеры (ADAM-4068) — с управлением по протоколу RS485, для которого используется дополнительный контроллер-преобразователь (ICPCON-7188E2) интерфейсов Ethernet/RS485 для подключения к ЭВМ по протоколу Ethernet (10 Мбит/с). Контроллеры интегрированы в модуль управления, дополненный ручными переключателями блокировки-управления

пневмоклапанами и диодами для защиты контактов коммутационных реле. Модуль контроллеров имеет малое энергопотребление и питается от источника постоянного тока напряжением 24 В (или 27 В) — так же, как и электромагниты пневмопереключателей (марки ПЭК-ДД), обеспечивающих распределение сжатого газа для управления криогенными пневмоклапанами.

Предусмотрены две альтернативные схемы режима бесперебойного питания электромагнитных пневмопереключателей. В обеих предусмотрено использование индивидуальных источников питания каждого распределительного пневмоцилиндра, объединяющего до 15 электромагнитных пневмопереключателей. При этом каждая группа из 15 пневмопереключателей питается от индивидуального источника.

Первый вариант. Источники питания (нестабилизированные; 7,5 А; 27 В постоянного тока) подключаются по два к выходу промышленного аккумуляторного источника бесперебойного питания 220 В переменного тока частоты 50 Гц, с нагрузочной способностью 1500 В·А (до 980 Вт). При этом обеспечивается устойчивость системы управления к краткосрочной потере фазы силового питания на гарантируемый период до трёх минут — в зависимости от действующей нагрузки и состояния аккумуляторов.

Альтернативный вариант подключения источников питания предполагает подключение их выходов к мощному аккумуляторному блоку резервируемого питания, который коммутирует на выход либо питание со штатных источников питания пневмоцилиндров, либо — при отключении сети — со встроенных аккумуляторов (24 В, 50 А·ч). Расчётное время питания в аварийном режиме — более часа, что представляется достаточным — по накопленному опыту эксплуатации.

Рабочий ток каждого электропневмоклапана — 0,5 А, напряжение питания — от 20 В до 30 В постоянного тока.



#### 5.2.4. Подключение вакуумных ресиверов

При нарушении сверхпроводимости соленоидов детектора происходит их нагрев за счёт диссипации запасённой энергии электромагнитного поля. Возникающий теплоприток к жидкому гелию в криостатах соленоидов приводит к высокоинтенсивному парообразованию и быстрому повышению давления газа. При превышении порогового значения давления срабатывают предохранительные устройства и отводят из криостатов избыточное давление газа в атмосферу.

Предусмотрен способ эвакуации интенсивного потока паров жидкого гелия по магистральному трубопроводу газосброса в предварительно отвакуумированные сосуды большой ёмкости — вакуумные ресиверы ( $2 \times 175 \text{ м}^3$ ).

Рядом с предохранительными устройствами гелиевых криостатов установлен датчик избыточного давления гелия (типа БД, с пределом измерения 0,1 МПа). Датчик подключен к контроллеру системы автоматизированного управления Криогенной станции, обеспечивающими подключение ресиверов по заданному алгоритму.

Контроллер промышленного исполнения типа ОВЕН [88], имеющий восемь входных контролирующих и восемь выходных управляющих каналов, обеспечивает электропитание и оцифровку измерительного тока от 4 мА до 20 мА датчика давления, а также анализ его показаний и выдачу последовательности команд управления на отсечные клапаны.

Два дистанционно управляемых клапана с электромеханическим приводом, способными переключаться в за времена от 2 с до 5 с, обеспечивают предварительное отключение маслянного газгольдера от линии газосброса и последующее подключение к ней отвакуумированных ресиверов, а также обратную процедуру.

Дополнительные электроуправляемые клапаны соединяют ресиверы со средствами вакуумирования, эвакуации и утилизации принятого гелия. Связанные с ними процедуры возлагаются исключительно на автоматизированную систему управления оборудованием Криогенной станции и её персонал.

Предварительное отключение масляного газгольдера с максимальным рабочим объёмом 20 м<sup>3</sup> необходимо для защиты от выброса масла из масляного затвора избыточным потоком гелия (до 400 м<sup>3</sup>).

Нарушение функционирования газгольдера способно привести к аварийной остановке связанного с ним компрессора среднего давления (2,5 МПа), обеспечивающего работу гелиевого рефрижератора детектора КЕДР. Без действующего рефрижератора испарение жидкого гелия в криогенной системе детектора (до 400 л в час) сравнимо с её минимальными суточными издержками в нормальном детандерном режиме работы рефрижератора.

Активация ресиверов происходит при превышении запрограммированного порогового значения давления (0,05 МПа), деактивация — при снижении давления ниже другого порогового значения (0,02 МПа). Разница пороговых значений давления (так называемый гистерезис), а также удалённость контролирующего давление датчика от приёмных сосудов (длина трубопровода до 600 м) — предохранят контроллер от провоцирования ложных повторных включений при отработке процедуры отключения ресиверов.

Объективный контроль за переключениями вакуумных ресиверов и газгольдера обеспечивает отслеживание состояния сигнализаторов конечных положений их клапанов электронными средствами сопровождения детектора КЕДР.

### 5.3. Вычислительный комплекс

Ядром вычислительного комплекса криогенного сопровождения детектора КЕДР являются многозадачные персональные ЭВМ с аппаратно расширяемой функциональностью (открытой системной архитектурой).

Первое важно для разработки и отладки программного кода. Второе существенно для поддержки адаптеров сопряжения с аппаратурой сопровождения (контроля и управления).

Электроника в стандарте КАМАК требует непрерывного пошагового программирования её функций. Выполнение этой работы возлагается на так называемую управляющую центральную ЭВМ.

Изначально эта роль распределялась между несколькими КАМАК-ЭВМ ОДРЁНОК. Будучи специализированными интеллектуальными КАМАК-контроллерами, они были удобны для работы с аппаратурой КАМАК, но из-за аппаратных ограничений не могли конкурировать с полноценными ЭВМ. Особенно сказывался недостаток оперативной памяти, а также необходимость большого количества служебных модулей для организации иерархической системы управления, оставляющих мало места в КАМАК-группах для целевых модулей на КАМАК-магистрали.

Пульт оператора-технолога представлял собой несколько алфавитно-цифровых терминалов (для каждой КАМАК-ЭВМ) и растровыми (графическими) мониторами. Для взаимодействия с системой использовалась псевдографика алфавитно-цифровых мониторов, графика низкого разрешения ( $256 \times 256$  точек) растровых цветных дисплеев и клавиатуры, запрограммированные на инициирование функций управления в одно касание избранных кнопок, в том числе — по селекции отображаемых на мониторах объектов перемещением целеуказателя.

С использованием КАМАК-ЭВМ ОДРЁНОК были осуществлены

стендовые криогенные испытания криогенных компонент детектора КЕДР. В дальнейшем для криогенного сопровождения некоторое время использовалась ЭВМ MicroVAX/VMS, служившая базовой вычислительной станцией и многоканальной (до 48 каналов) КАМАК-станцией эксперимента КЕДР. Использование развитых сервисных функций операционной системы VAX/VMS и мощных компиляторов с языка высокого уровня (С, англ.) для разработки программного обеспечения являлись явным преимуществом криогенного сопровождения на основе этой системы. Взамен 24-разрядных КАМАК-контроллеров ОДРЁНОК и СС-24S с линиями связи с ЭВМ из трёх толстых коаксиальных кабелей (типа отечественного РК-75-4), аппаратно поддерживались 16-разрядные КАМАК-контроллеры К0607 с одним тонким кабелем связи с ЭВМ (типа РК-75-2).

С описанным вычислительным комплексом осуществлялись криогенные испытания отдельных участков системы криогенного обеспечения детектора по мере завершения их монтажа. Очевидным недостатком этого вычислительного оборудования была конкуренция за вычислительные ресурсы с задачами, не связанными с криогенным обеспечением, а также сохранившаяся от прежней вычислительной системы аппаратная конфигурация пульта оператора-технолога с управлением по клавишам, отдельными алфавитно-цифровым и графическими мониторами.

Переход на персональные ЭВМ с поддержкой терминала с высоким графическим разрешением (VGA, SVGA), сетевой архитектуры на основе ETHERNET (10 Мбит/с), открытой системной шины (ISA, 33 МГц), многозадачной операционной системы квазиреального времени с мультиоконным интерфейсом пользователя (LINUX, X-windows, англ.), манипулятором экранного целеуказания («мышь»), а также развитого программного обеспечения с открытым кодом (GNU GPL, англ.) — качественно изменил архитектуру вычислительного комплекса криогенного

сопровождения детектора КЕДР. По мере совершенствования аппаратной платформы ЭВМ, производилась замена используемого вычислительного оборудования на более производительное.

Таким образом, основную задачу по управлению электроникой криогенного обеспечения осуществляет системный модуль персональной ЭВМ, оснащённый адаптерами:

- PPI-6 — параллельно-последовательной шестиканальной связи с КАМАК-аппаратурой;
- FAST ETHERNET — для информационного обмена с удалёнными контроллерами электроники сопряжения с криогенными устройствами.

Расположение управляющего модуля вблизи модулей КАМАК привело к сокращению длины кабелей связи, а также количества кабелей, ведущих к пульту оператора. Это благоприятно отразилось на помехоустойчивости системы.

Рисунок 5.1 демонстрирует пост управления (пульт) оператора-технолога. На рисунке 6.1 приведено изображение мнемосхем в режиме работы.

Аппаратные функции пульта оператора-технолога реализуются другой ЭВМ. Её основная функция — поддержка мультимедийного терминала расширенной комплектации, включающего:

- два графических дисплея,
- алфавитно-цифровую клавиатуру,
- манипулятор экранного целеуказания «мышь»,
- звукоизлучатели (системный и выносные).

С целью повышения надёжности системы управления, применено резервирование задействованных ЭВМ. Резервные ЭВМ имеют аппаратное и программное обеспечение, идентичное обеспечению действующих ЭВМ. Для активации в системе резервной ЭВМ взаимодействия с КАМАК-аппаратурой

потребуется дополнительные несложные перекоммутации. Для задействования резервной терминальной ЭВМ дополнительных действий не нужно, так как она является постоянно действующей. Таким образом, пульт оператора-технолога имеет два терминала, один из которых запасной и может быть незамедлительно использован в любое время в качестве основного. С запасного терминала осуществляется сопровождение системы питания сверхпроводящей системы детектора, являющейся дополнительной функцией дежурного оператора-технолога криогенной системы.

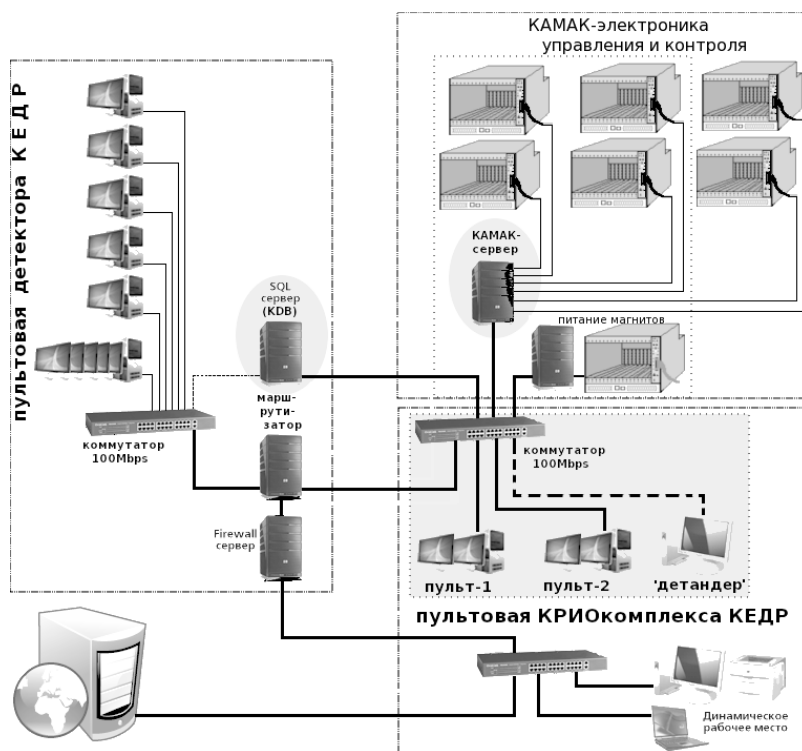


**Рисунок 5.1.** Пост (пульт) управления оператора-технолога криогенного комплекса

Все задействованные ЭВМ объединены (Рисунок 5.2) в одноранговую локальную сеть (типа «звезда») информационного обмена по протоколу ETHERNET (FAST ETHERNET) посредством автоматических электронных коммутаторов (SWITCH). Выделены два коммутатора: один — поддерживает локальную сеть сопровождения криогенного обеспечения и системы питания

сверхпроводящих магнитов, а также связь с вычислительной сетью детектора КЕДР, второй — обеспечивает связь с прочими сетями, в том числе с глобальной сетью Интернет. Для реализации этой архитектуры в терминальных ЭВМ задействованы дополнительные сетевые адаптеры и соответствующие сервисы операционной системы (в том числе защитные).

Контроль целостности локальной вычислительной сети осуществляется периодическим обменом тестовыми сообщениями удалённых ЭВМ с терминалом оператора-технолога, обеспечивающим оперативное информирование о возникающих проблемах.



**Рисунок 5.2.** Вычислительная сеть криогенного комплекса (справа) и её окружение

Таким образом, к числу применённых мер повышения надёжности криогенного сопровождения относятся:

- модульная организация аппаратного обеспечения,

- резервирование аппаратуры,
- дублирование аппаратуры вычислительной системы,
- архивирование контрольной информации на удалённом сервере,
- резервирование линий электроснабжения,
- использование аккумуляторных источников бесперебойного электропитания.



## Глава 6. Программное обеспечение криокомплекса

### 6.1. Вычислительная платформа

Программное обеспечение криогенного сопровождения детектора КЕДР базируется, преимущественно, на свободно распространяемых вычислительных технологиях и инструментарии с открытым исходным кодом (по лицензии GNU GPL (англ.)).

Основной операционной системой ЭВМ криогенного сопровождения выступает LINUX (англ.). Она же обеспечивает функционирование ключевых вычислительных рабочих и серверных станций эксперимента КЕДР, придя на смену серверной операционной системе VAX/VMS на устаревшей аппаратуре MicroVAX.

Используются свободно распространяемые сборки SCIENTIFIC LINUX (англ.), поддерживаемые ведущими зарубежными научными центрами.

ЭВМ пульта управления контроллером поршневого детандера работает под управлением операционной системы типа MICROSOFT WINDOWS XP PROFESSIONAL (англ.). В этой среде осуществляется также поддержка низкоуровневого программирования встроенного в контроллер детандера микропроцессора (типа ADuC (англ.), от компании ANALOG DEVICES (англ.)).

Важные преимущества операционной системы LINUX — поддержка многозадачности, сетевой информационнообменной среды и удобного мультиоконного экранного графического интерфейса X-Windows (X11) (англ.). Кроме того, она поддерживает мультисеансовую работу многих пользователей одновременно — как с консольного терминала, так и с удалённых — через информационнообменные сети.

К недостаткам LINUX стандартных сборок стоит причислить отсутствие

поддержки строго детерминированных задач реального времени. Однако, при высокой вычислительной мощности современных процессоров этот недостаток компенсируется для таких задач поддержкой алгоритмов квазиреального времени: распределение процессорного времени происходит поочередно между непривилегированными задачами в соответствии с присвоенными им приоритетами и доступностью им затребованных аппаратных ресурсов. Характерный квант активности каждой задачи оценивается величиной порядка 10 мс.

## 6.2. Взаимодействие с аппаратурой

Особенность высокоуровневых операционных систем, к числу которых принадлежит и LINUX (англ.), состоит в узурпации ресурсов вычислительной аппаратуры, на которой они развёрнуты. Непривилегированным задачам предоставляются библиотеки функций, осуществляющих через так называемые системные вызовы обращение к драйверам — системным программам, реализующим информационный обмен с аппаратурой.

Посредством драйверов поддерживается важнейший механизм взаимодействия с аппаратурой в реальном времени. Это — аппаратные прерывания, то есть сигналы привлечения внимания к себе со стороны аппаратуры, электрически передаваемые в центральный процессор.

Запуск функции обработки (драйвером) прерывания происходит асинхронно — незамедлительно, без синхронизации с состоянием исполняемой задачи или функции в момент возникновения прерывания.

Работа с прерываниями из непривилегированных задач в многозадачной среде осложнена необходимостью перераспределения процессорного времени между несколькими задачами, то есть может происходить с обусловленной этим фактором задержкой.

В среде LINUX (англ.) для непривилегированных задач предусмотрен механизм синхронной обработки сигналов аппаратных прерываний — после явного обращения к операционной системе посредством определённого системного вызова (`select`, англ.).

Основной недостаток синхронного обработчика прерываний — неэффективная трата выделяемого задаче процессорного времени на посылку запросов операционной системе о наличии зарегистрированных прерываний, а также необходимость использования циклического алгоритма для периодического осуществления процедуры запроса. Очевидно, при этом вносится дополнительная задержка по активации обработчика прерывания, определяемая интервалом времени между такими последовательными запросами.

При анализе способов межзадачного взаимодействия в среде LINUX (англ.), был выявлен полный аналог механизма асинхронной обработки аппаратных прерываний, действующий на уровне непривилегированных задач. На его основе был разработан способ асинхронной обработки аппаратных прерываний непривилегированными задачами — с предопределением в составе задачи функции обработки ожидаемых прерываний и командами управления разрешением и запрещением прерывания задачи.

Суть предложенного способа — в использовании имеющегося механизма сигналов и специально разработанного системного драйвера, посылающего непривилегированной задаче предопределённый сигнал при обнаружении аппаратного прерывания.

Сигнальный механизм поддерживается набором системных вызовов (`signal`, `sigaction` (англ.) и другими), определяющих асинхронный обработчик ожидаемого задачей сигнала, или группы сигналов. Маскирование позволяет заблокировать, или разрешить обработку сигналов. Кроме того, можно запрещать, или разрешать генерацию ожидаемого задачей сигнала (то есть

аппаратного прерывания) средствами самого драйвера, через системные вызовы соответствующих его функций.

На основе описанного механизма появилась возможность эффективного управления аппаратурой криогенного сопровождения посредством КАМАК-адаптера, работающего в режиме разрешённых аппаратных прерываний, в рамках одной задачи.

Благодаря однозадачности и использованию механизма асинхронного обслуживания прерываний основного программного обеспечения, сохраняется архитектурное подобие устройству простейших вычислительных платформ, унаследованная от первой реализации на КАМАК-ЭВМ. Это существенно упрощает адаптацию задачи под современные встраиваемые микропроцессорные контроллеры, не имеющие высокоразвитых операционных систем.

Такое решение потенциально перспективно на фоне растущих производительности и функциональности микропроцессорной техники, способствующих замещению магистрально-модульной компоновки вычислительных систем сопровождения распределёнными.

### **6.3. Архитектура программного обеспечения**

Программное обеспечение криогенного сопровождения детектора КЕДР состоит из следующих основных частей:

- 1) системного драйвера генерации в реальном времени для главной программы заявленных ею системных сигналов по ожидаемым аппаратным прерываниям,
- 2) главной программы дистанционного управления в реальном времени технологическими процессами криогенного обеспечения детектора и взаимодействия с оператором-технологом.

К вспомогательному программному обеспечению относятся:

- 1) программы дистанционного мониторинга криптоновой системы в реальном времени,
- 2) веб-приложения мониторинга контрольных параметров криогенной системы по выборкам из Базы данных,
- 3) приложения графического анализа сохранённых в Базе данных параметров криогенной системы для программы root,
- 4) программы стенда дистанционного управления поршневым детандером в реальном времени,
- 5) вспомогательные системные утилиты.

Архитектура основного программного обеспечения следует принципу модульной компоновки в рамках одной задачи.

Его поддержка реализована использованием при разработке программ высокоуровневого объектно-ориентированного языка программирования C++ (англ.), который к тому же отличается известной степенью структурированности и самодокументируемости разрабатываемого с его помощью кода.

Хорошая документированность и структурированность исходного кода программ упрощает его сопровождение, включая перспективное расширение функционала.

### **6.3.1. Системное программное обеспечение**

Основной механизм взаимодействия главной программы с аппаратурой предполагает обязательное посредничество системных драйверов, функционирующих в привилегированном статусе операционной системы.

Особенностью используемого контроллера КАМАК-аппаратуры является возможность прямого доступа задачи к его регистрам по системной шине ISA

(англ.). Для этого задача должна обладать статусом привилегированного администратора системы, что достигается

Вызов функций драйвера из непривилегированных программ требует использования так называемых системных вызовов — выделенных команд операционной системы. Их исполнение происходит в привилегированном статусе операционной системы, поэтому вызывает переключение контекста задач системного процессора при каждом обращении.

### 6.3.2. Прикладное программное обеспечение

Программные модули главной программы сгруппированы по функциональному назначению в отдельных разделах файловой структуры. Каждому типу обслуживаемых устройств поставлены в соответствие отдельные классы программных объектов. Инициализация однотипных объектов также сгруппирована по отдельным файлам.

В главной программе можно выделить три модуля:

- 1) инициализации образов объектов сопровождения (в том числе аппаратуры);
- 2) цикл визуализации образов и обслуживания объектов сопровождения (в том числе пульта-терминала оператора-технолога);
- 3) асинхронной обработки аппаратных прерываний (с получением величин параметров).

Модуль инициализации выполняет следующие действия:

- 1) создаёт образы объектов криогенного сопровождения,
- 2) инициализирует аппаратуру и запускает её в рабочий цикл,
- 3) инициализирует механизм использования системных сигналов,
- 4) передаёт управление основному модулю.

Основной модуль выполняет следующие действия:

- 1) обрабатывает запросы с терминала оператора-технолога,
- 2) обновляет индикаторные диаграммы (мнемосхемы) образов сопровождаемых объектов,
- 3) обрабатывает параметры по алгоритмам автоматического управления,
- 4) архивирует данные (в том числе через Сеть) по сигналам системного таймера,
- 5) взаимодействует с клиентами через Сеть (socket, англ.), в том числе с Базой данных.

Модуль асинхронной обработки аппаратных прерываний выполняет следующие действия:

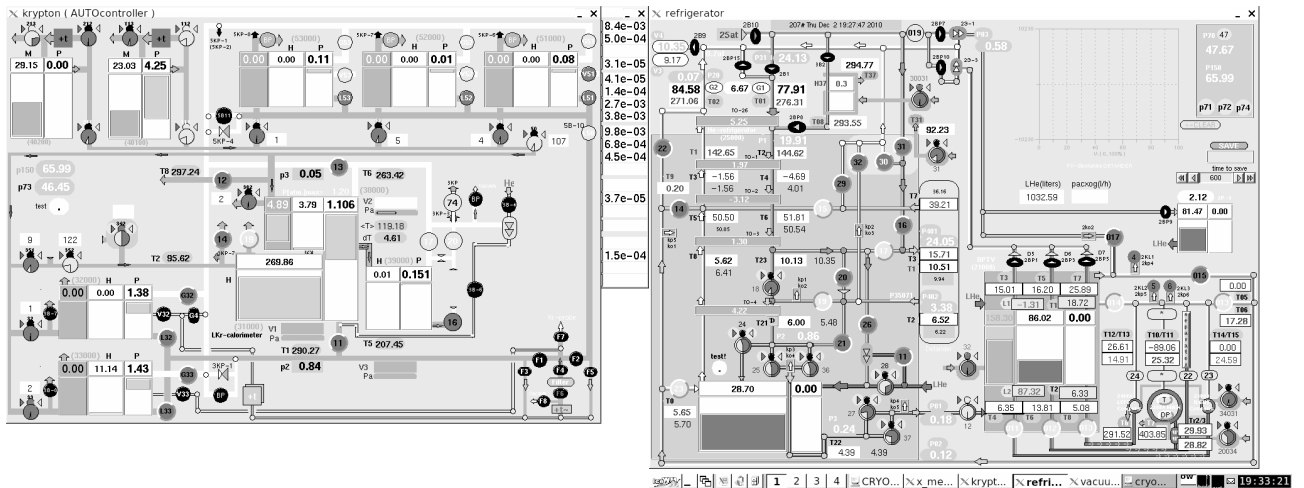
- 1) определяет источник прерывания среди аппаратных модулей,
- 2) взаимодействует с соответствующим модулем,
- 3) обновляет параметры полученными от модуля данными,
- 4) выставляет сигналы обновления образа объекта для его обслуживания в основном программном модуле.

#### **6.4. Активные мнемосхемы**

Основным способом визуализации состояния криогенного оборудования в реальном времени являются активные мнемосхемы.

Мнемосхема (Рисунок 6.1) является обобщённым и условно упрощённым цветным графическим рисунком принципиальной пневмогидравлической схемы сопровождаемой системы криогенного обеспечения.

На ней представлены подвижные индикаторные диаграммы состояния контрольных параметров сопровождаемого криогенного оборудования, в том числе числовые значения, показанные на фоне его условно обозначенных образов.



**Рисунок 6.1.** Мнемосхемы: слева — криптоновая и азотная системы, справа — гелиевая

Обновление индикаторов (и числовых значений параметров) осуществляется в реальном времени. Таким образом, оператор получает наглядное представление реального состояния криогенной системы. При этом нет необходимости держать в памяти большой объём дополнительной технической информации. Отображены все важные компоненты, включая защитные, управляющие и контролируемые криогенные устройства. Причём, что важно, учтено их реальное пространственное расположение относительно направлений движения потоков криогенной среды. Это помогает отслеживать динамику медленно протекающих процессов.

К примеру, если на принципиальной схеме расположение какого-то датчика вблизи разветвления трубопровода (тройника) может быть на любой его ветке, то мнемосхема отображает его именно на том месте и, по возможности, пропорциональном (в масштабе конкретного участка диаграммы) удалении от развилки, где он реально смонтирован.

Отличительной особенностью активной мнемосхемы является её использование для подачи команд управления исполнительными устройствами. Они условно представлены на мнемосхеме с помощью



интерактивных графических форм. При наведении графического целеуказателя на такой объект, нажатие predetermined кнопок манипулятора целеуказания или клавиатуры инициирует связанную с этим событием запрограммированную функцию.

Для разработки мнемосхем использована библиотека графических форм Xforms (англ.) со специализированным графическим редактором fdesign (англ.) на её основе [89]. Использование специализированного редактора существенно упрощает разработку графики мнемосхем и сокращает затрачиваемое на это время.

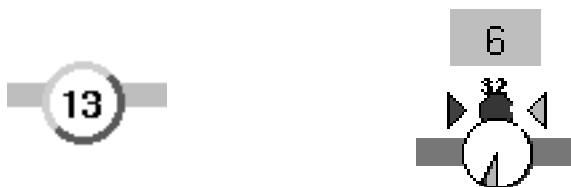
При разработке мнемосхем широко использовалось цветовое кодирование информации. Трубопроводы обозначены на мнемосхемах горизонтальными и вертикальными цветными прямоугольниками (полосами) различных видов. Исполнительные устройства обозначены кругами с числовой маркировкой — отдельными, или с дополнительными спутниками. Исполнительные устройства без электрического интерфейса показаны чёрным цветом с контрастной маркировкой. Изображение датчиков составлено из числового кода, ассоциированного с его документированным шифром, и числового значения. Различные типы датчиков отличаются по форме отображения. Более важные значения показаны более заметными.

Для улучшения восприятия информации, использован максимально допустимый размер шрифтов. Расположенные на трубопроводах исполнительные устройства и датчики отображены, по возможности, выровненными друг относительно друга по вертикали и горизонтали (в узлах воображаемой сетки).

#### **6.4.1. Активация двухпозиционного клапана**

Двухпозиционные клапаны (Рисунок 6.2) отображаются на мнемосхемах

цветным кружком с цифровым обозначением внутри, ассоциированным с документированным шифром клапана. Например, клапан с шифром 30013 обозначен номером 13.



**Рисунок 6.2.** Двухпозиционный (слева) и регулирующий (справа) клапаны на мнемосхеме

Для инициирования процедуры управления двухпозиционным клапаном необходимо переместить целеуказатель на значок клапана и зафиксировать команду нажатием его соответствующей кнопки (левая кнопка целеуказателя запрограммирована на ОТКРЫТИЕ двухпозиционного клапана, а правая — на ЗАКРЫТИЕ).

Затем предлагается подтвердить свой выбор в диалоговом режиме появляющегося тут же, в отдельном окне, вопроса (для исключения случайных нажатий).

После исполнения команды значок клапана будет окрашен в соответствующий цвет — красный (ЗАКРЫТО), или зелёный (ОТКРЫТО).

Изменение цветовой маркировки номера клапана на его значке также несёт дополнительную информацию, не загромождая мнемосхему дополнительными сообщениями о последовательности прохождения команды: белый цвет цифр говорит о воспринятой электроникой команды ОТКРЫТЬ, чёрный цвет — о воспринятой команде ЗАКРЫТЬ. Если цвет числовой маркировки изменился, но соответственно не изменился цвет значка клапана, это сигнализирует об отказе модуля электропривода клапана.

### 6.4.2. Активация регулирующих клапанов

Для управления регулирующим клапаном оператор должен навести целеуказатель на значок клапана (Рисунок 6.2), выбрав на нём одну из кнопок, передающих соответствующие команды ОТКРЫТЬ, или ЗАКРЫТЬ.

Порядок прохождения команд помогает отследить дополнительный цветовой сигнализатор, окрашивающийся в конечных положениях регулятора клапана в соответствующий красный (ЗАКРЫТО) или зелёный (ОТКРЫТО) цвет.

Промежуточное положение регулятора клапана отображается на круговой секторной диаграмме. Если на ней преобладает цвет зелёного сектора, то клапан ПРИОТКРЫТ, а красного — ПРИЗАКРЫТ. Число рядом с изображением клапана указывает степень открытия клапана в процентах.

Команда СТОП распознаётся при наведении целеуказателя на эту диаграмму.

### 6.4.3. Представление криогенных сосудов

Состояние криогенных сосудов на мнемосхемах представлено совокупностью двух или трёх разноцветных вертикальных, одинакового размера по высоте, расположенных рядом столбиковых диаграмм с дублирующим числовым обозначением сверху (Рисунок 6.4).

Контур диаграмм образует прямоугольник, ассоциируемый с границами сосуда. Одна из диаграмм имеет динамику заполнения снизу вверх и ассоциируется с уровнем жидкости в сосуде. Другая диаграмма имеет динамику заполнения сверху вниз и ассоциируется с давлением газа в сосуде. Третья диаграмма аналогичного типа представляет давление жидкого азота на выходе из азотного теплообменника сосуда, если таковой имеется.

Схемный шифр сосуда указан в скобках рядом с изображением.

(32000) Н		Р
0.00	104.25	1.71

**Рисунок 6.4.** Криогенный сосуд на мнемосхеме

### 6.5. Вспомогательный дистанционный мониторинг

Главная программа криогенного сопровождения разработана для обслуживания пульта оператора-технолога криогенной системы.

Для осуществления дистанционного мониторинга состояния системы в реальном времени через сеть информационного обмена, разработано дополнительное программное обеспечение. Оно реализует взаимодействие с главной программой по методу клиент-сервер.

Основой этого проекта стали открытые библиотеки сетевых протоколов, построенные на использовании программных портов (socket ,англ.).

Клиентский интерфейс представлен простой мнемосхемой, аналогичной используемой в главной программе, но с заблокированными функциями управления исполнительными устройствами. Изменение состояния графических объектов на мнемосхеме происходит одновременно с получением обновлённых данных сервером.

Серверные функции интегрированы в главную программу. Выдача информации клиентам происходит по протоколу TCP/IP (англ.). Методы дополнительного шифрования не поддерживаются.

Безопасность информационного обмена возлагается на

административно-технические процедуры. Например, использование шифрованного протокола ssh (англ.) для доступа в локальную сеть, ограничений доступа по списку доверенных адресов IP (англ.) и другие.

### **6.6. Интернет-публикации**

Осуществлён проект публикации контрольных параметров сопровождаемой криогенной системы на сервере публичного доступа информационной системы детектора КЕДР.

Информация представлена в виде таблицы графиков, а также таблицы контрольных параметров. Обновление данных происходит автоматически, с заданной периодичностью, определяемой периодичностью обновления соответствующих значений в Базе данных. Можно получить обобщённые графики публикуемых параметров за текущие сутки, за последние неделю, месяц, год.

Отдельная таблица избранных контрольных параметров разработана для криптоновой системы. В ней указывается дополнительная аналитическая информация, влияющая на сопутствующее сигнальное звуковое сопровождение в начале её демонстрации.

### **6.6. Архивирование и База данных эксперимента**

Проведение экспериментов по физике высоких энергий предполагает накопление информации в электронной форме с систем универсального детектора за длительный промежуток времени — несколько месяцев, лет.

Для архивирования и централизованного хранения информации используется система управления Базой данных PostgreSQL (англ.) [90], которая развёрнута на выделенном серверном оборудовании. Для поддержки

коллективно используемых специализированных форматов и функций, совместно с ней используется специализированная библиотека [91] для программирования на языке C++.

Состояние некоторых параметров криогенной системы напрямую влияет на получение экспериментальных данных, поэтому имеет особую важность для ретроспективного анализа условий проведения эксперимента и внесения коррекции в алгоритмы обработки заархивированных зарегистрированных данных наблюдаемых процессов. Например, изменение давления газообразного и температуры жидкого криптона в криогенном калориметре, которое приводит к чувствительному изменению длины свободного пробега носителей заряда в нём.

Сохранение параметров криогенной системы ведётся в реальном времени, с заданной периодичностью. Информация накапливается как в локальной файловой системе главной ЭВМ, так и в публичной Базе данных.

Характерный период архивации выбран равным 10 минутам, но может быть оперативно изменён по усмотрению оператора-технолога.

Публикация информации в Базе данных рассматривается как способ её протоколирования для объективного контроля, а также как дополнительная мера по обеспечению её сохранности.

### **6.7. Графический анализатор в приложении root**

Для визуализации сохранённой в Базе данных информации применяется известное программное средство создания и анализа графиков — пакет root (англ.) [92].

С помощью разработанных под него программных утилит (функций) можно производить выборку данных за нужный период времени, обрабатывать по заданному алгоритму и представлять на графиках (например, Рисунок 3.11).

Последующая интерактивная работа с полученными графиками осуществляется удобными встроенными средствами самого пакета root.

## Глава 7. Методика управления криокомплексом

### 7.1. Управление рефрижератором

Гелиевый рефрижератор способен работать в двух основных режимах — дроссельном и детандерном, а также в их комбинации.

Дроссельный режим характеризуется наивысшим потреблением стороннего жидкого гелия системой (расход  $\sim 1100$  литров в сутки). Детандерный режим является наиболее экономичным (расход  $\sim 400$  литров в сутки). Эти показатели учитывают среднее количество подпитки системы жидким гелием по номинальному объёму транспортных сосудов, в которых он доставляется со стороны.

Запуск рефрижератора в работу совмещается с захолаживанием оборудования гелиевой системы по следующему протоколу:

- заполнение рабочего объёма гелиевой системы чистым газообразным гелием (вытеснение атмосферного воздуха),
- продувку противотоком гелия под давлением фильтров, теплообменников и трубопроводов от загрязнений,
- организацию продувки потока гелия среднего давления (2,5 Мпа) через азотный реверсивный теплообменник ( $T < 90$  К) по контуру: азотный теплообменник — рефрижератор — БПТВ — магниты — газгольдер до охлаждения криостатов магнитов до  $T < 100$  К,
- прекращение продувки потоком гелия с азотной температурой — с одновременным прекращением работы азотного теплообменника,
- заполнение БПТВ сторонним жидким гелием со сбросом нагретых  $T > 100$  К паров в газгольдер,
- перенаправление паров кипящего гелия с температурой  $T < 100$  К в гелиевый сборник рефрижератора — с одновременной организацией



циркуляции сжатого гелия в рабочем контуре рефрижератора с расходом потока  $40 \div 60$  кг/ч,

- накопление жидкого гелия до  $1,5 \div 2$  м<sup>3</sup> в БПТВ — с дальнейшей коррекцией расхода гелия в прямом потоке рефрижератора ( $60 \div 80$  кг/ч), задаваемой разностью температур входящего и исходящего потоков циркулирующего гелия,
- подача в криостаты магнитов жидкого гелия из БПТВ порциями при соблюдении ограничения по градиенту температуры  $T < 40$  К (разность между выходом и входом проходящего через криостаты потока газа), а также ограничения по темпу испарения подаваемого жидкого гелия, задаваемого скоростью утилизации (дополнительной откачки) паров гелия из газгольдеров (переменный объём с маслянным затвором принимающих газгольдеров  $\sim 2 \times 10$  м<sup>3</sup>) в ресиверы (хранилища) высокого давления,
- заполнение криостатов магнитов жидким гелием с периодическим пополнением запаса жидкого гелия в БПТВ до  $1,5 \div 2$  м<sup>3</sup>, соблюдая ограничение по его минимальному запасу до 25 % от номинального объёма сосуда (что эквивалентно минимальному уровню в БПТВ до 0,5 м, гарантирующему минимальное превышение уровня над потолком сообщающегося с ним сосуда криостата основного магнита),
- переключение в детандерный режим: включение детандера в прямой поток ( $T = 11$  К) вместо первого дроссельного регулирующего клапана.

## 7.2. Управление поршневым детандером

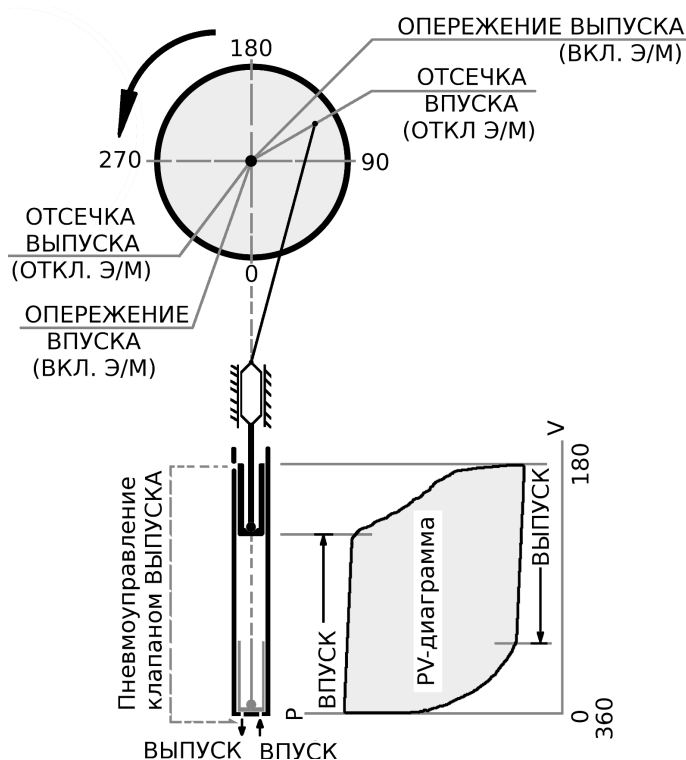
Гелиевый поршневой детандер с рабочей температурой  $6 \div 11$  К представляет собой поршневую пару цилиндр-поршень с газодинамической смазкой. Соприкасающиеся поверхности покрыты фторопластом-3 для

обеспечения лучшего скольжения при минимальных зазорах.

В герметичном нижнем основании цилиндра (днище) для рабочего газа предусмотрены впускной и выпускной каналы, запираемые нормально закрытыми пружинными клапанами. Верхнее подвижное основание цилиндра образует плоская поверхность поршня.

При перемещении поршня в цилиндре от днища до верхней точки вылета (останова) и обратно, жёстко связанный с поршнем маховик совершает полный оборот вокруг своей оси (Рисунок 7.1).

Два электромагнитных клапана — впуска и выпуска — управляют рабочим циклом. Они имеют неэлектрический привод: механический — у клапана впуска, пневматический — у клапана выпуска.



**Рисунок 7.1.** Схема и диаграмма работы поршневого детандера

Электромагниты не способны открывать клапаны. Они выполняют лишь

функцию удержания затворов клапанов в открытом положении. Это происходит благодаря приближению металлических элементов (якорей) затворов к сердечникам электромагнитов на минимальное расстояние ( $3 \div 5$  мм) в состоянии полного открытия клапанов.

При переключении направления тока питания электромагнита, производимого для размагничивания конструкционных материалов клапана, пружинный механизм возвращает затвор в положение закрытия клапана. Открывание клапана впуска происходит при соприкосновении поршня с днищем цилиндра в момент нажатия на выступающий из него элемент затвора. Открывание клапана выпуска происходит под давлением газа через отверстие в стенке цилиндра, открываемое при приближении поршня к высшей точке вылета из цилиндра.

Временная диаграмма работы клапанов задаётся специально разработанным микропроцессорным контроллером. Он подсчитывает сигналы с координатного датчика, генерируемые при повороте вращающегося маховика на каждый градус. Контроллер обеспечивает также управление переключением скорости вращения вала электромотора, связанного ременной передачей с маховиком. Выбор скорости вращения маховика определяет холодопроизводительность детандера.

Электромотор в качестве электрогенератора преобразует передаваемую поршнем маховику энергию сжатого расширяющегося газа в электрическую, отдаваемую в электросеть. Роль электрогенератора совмещается с ролью электродвигателя — стабилизатора частоты вращения маховика, а, следовательно, и линейных перемещений связанного с ним поршня, помогая преодолевать силы трения и проходить крайние точки останова.

За начало отсчёта принимается нижняя точка останова поршня, соответствующая нулевому объёму рабочей полости под поршнем. Это положение фиксируется при креплении датчика на корпус детандера

сопряжением вращаемых осей координатного датчика и маховика так, чтобы потух расположенный на корпусе датчика светящийся маркер.

Настройка режима работы детандера сводится к заданию абсолютных значений координат — углов поворота маховика, при которых производится включение (опережение открывания затворов) и переполюсовка (отсечка затворами потоков газа) электромагнитов удержания затворов клапанов, а также интервала (в градусах) действия токов размагничения затворов и значений токов удержания и размагничения (в миллиамперах).

Параметры настройки детандера для одного из установившихся режимов приведены в таблице 15.

**Таблица 15.** Параметры настройки клапанов детандера (пример)

Наименование параметра	ВПУСК		ВЫПУСК	
	Обозначение параметра	Значение параметра	Обозначение параметра	Значение параметра
Ток удержания, мА	$I_{\text{ВП}}^+$	84	$I_{\text{ВЫП}}^+$	35
Ток размагничения, мА	$I_{\text{ВП}}$	112	$I_{\text{ВЫП}}$	72
Угол опережения, градус	$\varphi_{\text{ВП}}^0$	320	$\varphi_{\text{ВЫП}}^0$	132
Угол отсечки, градус	$\varphi_{\text{ВП}}$	60	$\varphi_{\text{ВЫП}}$	280
Интервал размагничения, градус	$\tau_{\text{ВП}}$	24	$\tau_{\text{ВЫП}}$	18

Для коррекции параметров режима используется индикаторная PV-диаграмма зависимости пульсаций давления (P) от объёма (V) газообразного гелия в рабочем цилиндре под поршнем. Такой метод был описан в работе [87]. Его преимущество заключается в возможности диагностики работы детандера по характерному видоизменению диаграммы.

На диаграмме хорошо различимы точки и участки, соответствующие смене и длительности фаз рабочего цикла детандера:

1. Начало отсчёта.  $V = 0$ . Контроллер по координатному датчику отсчитывает

- угол поворота маховика  $\varphi = 0^\circ$ . Клапан выпуска закрыт и обесточен ( $I_{\text{вып}}=0$ ). Поршень касается днища цилиндра, объём газа под поршнем минимален ( $V = 0$ ). Затвор клапана впуска смещён поршнем в состояние открытия. Запитанный постоянным током ( $I_{\text{вп}} = I_{\text{вп}}^+$ ) электромагнит клапана впуска начинает удерживать его затвор в состоянии открытия.
2. Впуск. На PV-диаграмме этот участок — почти горизонтальная прямая. Поступающей через открытый клапан впуска поток сжатого ( $P_{\text{MAX}} = 2,5 \text{ МПа}$ ) гелия толкает поршень вверх. Давление в цилиндре максимально ( $P=P_{\text{MAX}}$ ), немного снижается из-за перемещения поршня.
  3. Отсечка впуска. Когда угол поворота маховика совпадает с заданным значением — параметром отсечки впуска ( $\varphi = \varphi_{\text{вп}} < 180^\circ$ ), контроллер переключает направление тока питания клапана впуска на противоположное ( $I_{\text{вп}} = I_{\text{вп}}^-$ ). При уменьшении тока удержания в момент переключения ( $I_{\text{вп}} \rightarrow 0$ ) клапан впуска закрывается.
  4. Охлаждение. На PV-диаграмме это участок гиперболического снижения давления. Оба клапана закрыты. Ток размагничивания клапана впуска через заданный интервал ( $\tau_{\text{вп}}$ ) отключается ( $I_{\text{вп}} = 0$ ). Давление порции сжатого газа, замкнутого в цилиндре под поршнем, продолжает перемещать поршень вверх. При этом газ совершает работу, в следствие чего охлаждается.
  5. опережение выпуска. В некоторый момент ( $0^\circ < \varphi = \varphi_{\text{вып}}^0 < 180^\circ$ ), опережающий момент срабатывания пневмопривода открытия клапана выпуска, включается ток питания клапана выпуска ( $I_{\text{вып}} = I_{\text{вып}}^+$ ). При этом открытия клапана выпуска ещё не происходит.
  6. Окончание охлаждения. С приближением поршня к высшей точке вылета из цилиндра — верхней точке останова (ВТО,  $\varphi = 180^\circ$ ) открывается отверстие в стенке цилиндра, через которое сжатый под поршнем расширяющийся газ открывает клапан выпуска. Давление в детандере при

- этом совершает небольшой скачок до минимального значения, хорошо различимый по ступеньке на  $PV$ -диаграмме. Благодаря опережению включения тока ( $I_{\text{вып}} = I_{\text{вып}}^+$ ), электромагнит клапана выпуска начинает удерживать его затвор открытым. Отсчёт угла поворота маховика  $\varphi = 180^\circ$ .
7. Выпуск. Поршень начинает движение вниз, выталкивая холодный газ через открытый клапан выпуска. При этом давление в детандере несколько возрастает. На  $PV$ -диаграмме это почти горизонтальная прямая.
  8. Отсечка выпуска. В момент, задаваемый углом отсечки выпуска ( $180^\circ < \varphi = \varphi_{\text{вып}} < 360^\circ$ ), происходит изменение направления тока электромагнита клапана выпуска на противоположное ( $I_{\text{вып}} = I_{\text{вып}}^-$ ). При уменьшении тока удержания в момент переключения ( $I_{\text{вып}} \rightarrow 0$ ) клапан выпуска закрывается.
  9. Демпфирование. Оба клапана закрыты. Поршень продолжает движение вниз. Остатки газа сжимаются, препятствуя удару поршня о днище. На  $PV$ -диаграмме это участок гиперболического роста давления вблизи начала отсчёта. Перед самым касанием днища поршень нажимает на выступающую часть затвора клапана впуска, досылая его в положение открытия.
  10. Опережение впуска. В некоторый момент ( $180^\circ < \varphi = \varphi_{\text{вп}}^0 < 360^\circ$ ), опережающий момент срабатывания механического привода открытия клапана впуска, включается ток питания клапана впуска ( $I_{\text{вп}} = I_{\text{вп}}^+$ ). При этом открытия клапана впуска ещё не происходит.

По плавности линий индикаторной диаграммы можно судить о характере трения поршня о стенки цилиндра. По смещению характерных точек на диаграмме можно судить об изменении температурного режима работы детандера. По нарушению формы диаграммы можно судить о нарушении рабочего режима детандера по давлению.

Благодаря разработанному микропроцессорному контроллеру,

выдающего в цифровом виде в ЭВМ сведения о заданных параметрах детандера и оцифровке сигналов с датчиков угловых координат и пульсаций давления, предложен оригинальный метод цветовой маркировки характерных участков индикаторной диаграммы, существенно облегчающий настройку и диагностику режимов работы детандера. Например, выделение двумя разными цветами участков прямого и обратного хода поршня позволяет быстро различать их при настройке режимов работы клапана впуска и выпуска соответственно.

При настройке рабочего режима детандера вначале отлаживается работа впускного клапана, затем выпускного.

Наиболее трудным при работе с детандером является режим его включения в работу. Благодаря наделению разработанного контроллера не только функциями управления клапанами, но и управления электромотором, эта процедура может быть выполнена дистанционно.

Вначале детандер захолаживается в течение часа до рабочей температуры ( $\sim 20$  К). Для этого он переводится в режим продувки — его клапаны открывают, а подача и сброс гелия осуществляется клапанами рефрижератора:

- входной и выходной клапаны перед детандером в рефрижераторе закрыты,
- чтобы подать в детандер порцию газа рабочего давления для пневмопривода его клапана выпуска, на время открывается и закрывается соответствующий клапан подачи газа перед детандером в рефрижераторе,
- контроллер в режиме продувки одновременно подаёт ток в электромагниты удержания затворов клапанов впуска и выпуска детандера, но их открытие не происходит,
- на один полный оборот проворачивается маховик детандера включением

электродвигателя детандера на низшей скорости вращения и отключением после первого оборота маховика,

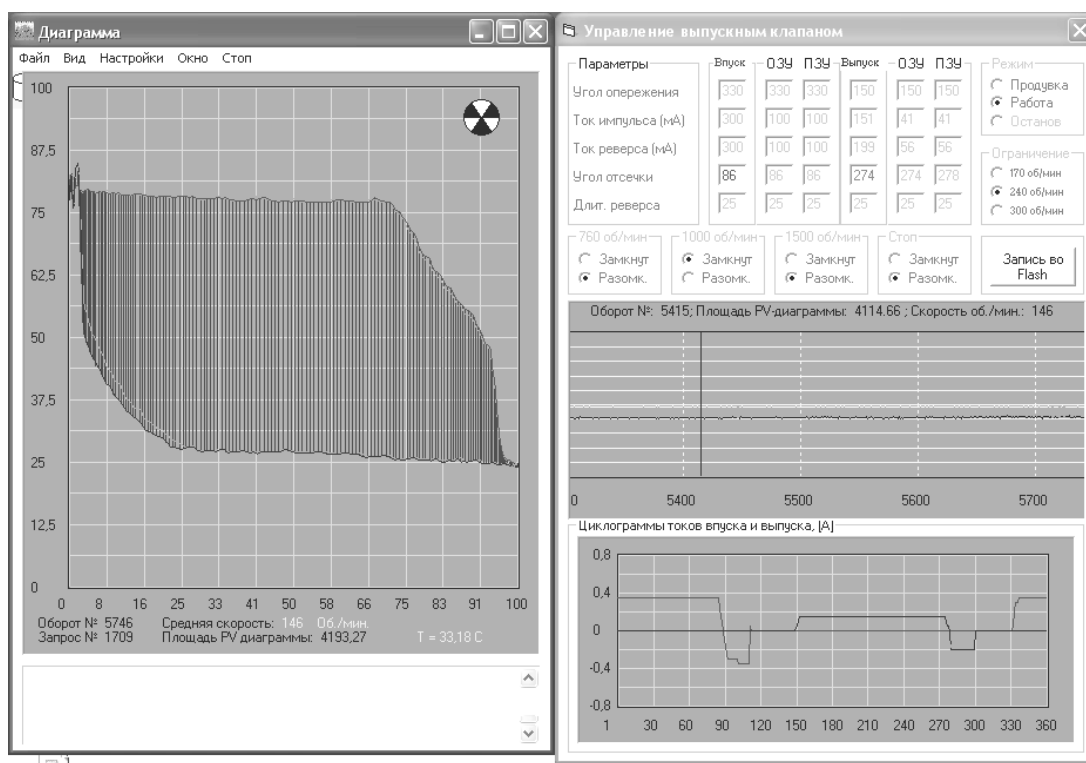
- в детандер порциями подаётся холодный гелий в течение часа для постепенного захлаживания — через дюзу и открываемый на  $1 \div 5$  с клапан рефрижератора; сброс гелия осуществляется через  $5 \div 10$  с через клапан газосброса из рефрижератора в газгольдер,
- примерно через час процедура захлаживания прекращается, контроллер переводит детандер из режима продувки в рабочий режим, при этом управление клапанами детандера начинает осуществляться по координатному датчику в соответствии с запомненными контроллером параметрами режима работы.

Порядок включения детандера в работу описывается следующей последовательностью условий и действий:

- клапаны рефрижератора перед детандером закрыты,
- контроллер включается в режим работы (но не продувки!),
- настраивается пусковой режим, для этого уменьшают на  $10^\circ \div 20^\circ$  относительно стационарного криогенного режима значения углов отсечки впуска (до  $\sim 50^\circ$ ) и выпуска (до  $\sim 240^\circ$ ),
- открывается клапан рефрижератора выпуска из детандера,
- прекращается работа дроссельного клапана рефрижератора, включенного параллельно детандеру,
- давление на выходе детандера снижается до минимального,
- на низкой скорости включается электродвигатель детандера,
- почти одновременно с запуском электродвигателя — после первого оборота маховика — открывается клапан рефрижератора подачи входного потока гелия рабочего давления в детандер,
- по индикаторной диаграмме настраивается рабочий режим, повышая



значения отсечек и подстраивая клапанами рефрижератора рабочее давление после детандера, при этом обращая внимание на температурный режим детандера — особенно на температуру входного потока, которая должна быть не ниже 10 К.



**Рисунок 7.2.** Панель управления детандером с помощью ЭВМ

К нарушению рабочего режима детандера часто приводит понижение температуры входного рабочего потока (до  $\sim 5$  К и менее) из-за избытка поступающих в рефрижератор паров гелия, либо из-за прерывания циркуляции рабочего потока газообразного гелия.

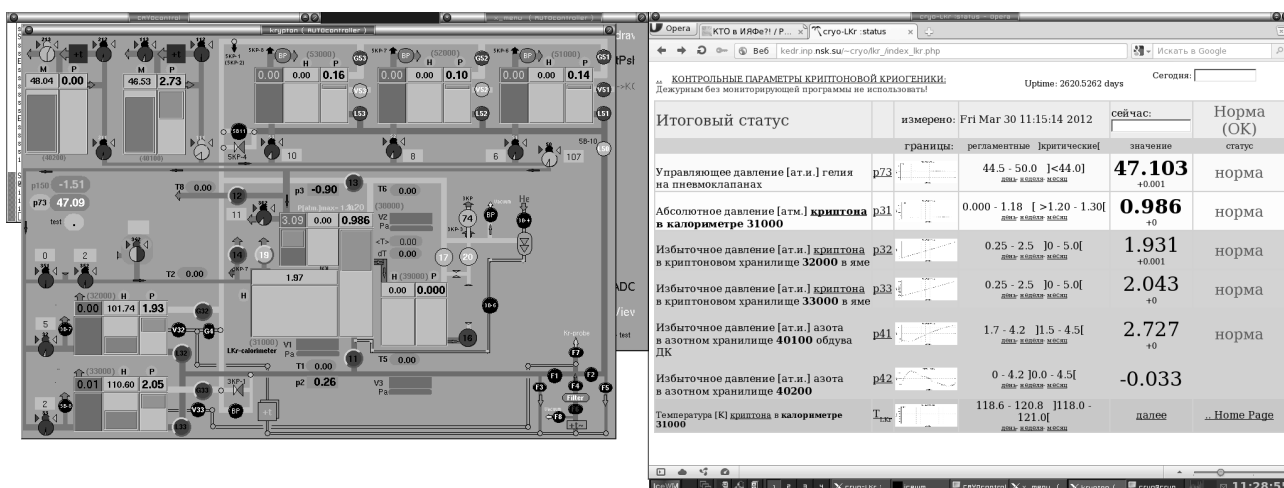
Восстановлению режима работы детандера может содействовать перевод рефрижератора на какое-то время в дроссельный режим работы. Если время простоя детандера при этом невелико (менее часа), то для возобновления детандерного режима обычно не требуется повторное захлаживание

детандера.

Программное обеспечение нового контроллера детандера позволяет наблюдать (Рисунок 7.2) за работой детандера и управлять его режимами дистанционно.

### 7.3. Управление криптоновым калориметром

Управление работой криптонового калориметра осуществляется с использованием менемосхемы криптоновой системы (Рисунок 7.3).



**Рисунок 7.3.** Мнемосхема криптоновой системы и веб-страница контрольных параметров

Основной рабочий режим калориметра связан с длительным хранением в нём жидкого криптона, сопровождающимся периодической продувкой жидкого азота через его встроенный теплообменник для снижения давления паров криптона путём их конденсации.

Наибольшую трудность из-за их длительности представляют режимы переноса жидкого криптона из калориметра в хранилища, между хранилищами, или из хранилищ в калориметр, а также режим фильтрации

жидкого криптона. Последний имеет последовательные стадии испарения жидкого криптона, нагрева газообразного криптона до комнатной температуры, пропускания через фильтр и конденсации в принимающем хранилище. Скорость процесса лимитируется низким темпом ожижения.

Все процедуры обычно исполняются в режиме ручного управления. Для упрощения повторяющихся операций, связанных с периодической манипуляцией управляющими клапанами, используется программное автоматическое регулирование исполнительными устройствами.

## **7.4. Оптимизация технологических процессов**

### **7.4.1. Газификатор жидкого азота**

Организация обдува торцов дрейфовой камеры детектора КЕДР чистым газообразным азотом позволила снизить диффузию кислорода в её рабочую газовую смесь, тем самым увеличить в ней время жизни носителей заряда и условия работы высоковольтных проволочных электродов.

Для получения чистого азота без примеси кислорода и прочих загрязнений используется жидкий азот, превращаемый в газ при помощи испарителей.

В качестве азотного газификатора предложено использовать хранилища жидкого азота системы криогенного обеспечения детектора КЕДР, оборудованные высокопроизводительными ( $270 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) индивидуальными испарителями и системой автоматической стабилизации давления. При этом не нарушается технология использования хранилищ жидкого азота системой криогенного обеспечения, заложенная при конструировании системы.

В связи с ограничениями, накладываемыми требованиями дрейфовой камеры детектора на отсутствие содержания в газообразном азоте примесей

кислорода, был разработан новый режим эксплуатации хранилищ с учётом нового требования.

Постоянно действующим выбрано одно из хранилищ, используемое как для выдачи жидкого азота в раздаточный коллектор, так и для его выдачи в испаритель для газификации и выдачи газообразного азота. Второе хранилище используется для накопления привозного жидкого азота из транспортных цистерн. Пополнение уровня жидкого азота в хранилище-газификаторе осуществляется под давлением самонаддува (с применением индивидуального испарителя жидкого азота этого резервуара) путём вытеснения жидкого азота из первого резервуара-накопителя в раздаточный коллектор, откуда жидкий азот поступает в резервуар-газификатор. На время этой процедуры давление в газификаторе понижается до минимально необходимого (3,5 МПа), обеспечивающего его непрерывное использование.

Схема отбора газообразного азота после любого из испарителей азотных резервуаров предусматривает использование в качестве газификатора любого из них.

Управление рабочим давлением в хранилищах жидкого азота возлагается на пружинные авторегуляторы давления.

При снижении рабочего давления газообразного азота в хранилище (вследствие отбора жидкого или газообразного азота внешними потребителями), регулятор пропускает жидкий азот в испаритель. Испарившийся азот возвращается в хранилище, повышая в нём давление до рабочего значения. При этом регулятор прерывает подачу жидкости в испаритель.

Главное достоинство пружинного регулятора — независимость от электроснабжения криогенного комплекса.

### 7.4.2. Стабилизация режимов рефрижератора

Принцип регулирования, аналогичный используемому в азотных хранилищах, был предложен автором для стабилизации входного давления циркулирующего потока гелиевого рефрижератора.

Из-за нестабильности давления, поступающего от компрессоров Криогеной станции, сбивалась настройка режимов рефрижератора, в котором в качестве управляющих устройств используются пневмоуправляемые клапаны.

Установка регулятора, автоматически стравливающего в газосброс часть потока сжатого гелия с давлением выше заданного, решила задачу стабилизации режимов работы рефрижератора.

### 7.4.3. Приём жидкого гелия

Идея отказаться от использования буферных сосудов ( $2 \times 1200$  л) для хранения в системе запасов жидкого гелия возникла после первых испытаний гелиевой системы, выявившей неэффективность их использования.

Благодаря наличию достаточного количества транспортных сосудов жидкого гелия, они могли быть использованы в качестве временных хранилищ. При этом сразу исключались дополнительные издержки от испарения при переливании из транспортных хранилищ в буферные.

Кроме того, возникла идея заполнения жидким гелием сосуда в БПТВ непосредственно из транспортных сосудов. Для этого понадобилась оснащение БПТВ переливалкой жидкого гелия, что впоследствии и было осуществлено.

Предложен также способ оптимизации процедуры, связанной с наддувом транспортных сосудов сжатым гелием низкого давления для вытеснения жидкого гелия при переливании.

Транспортные сосуды с жидким гелием кучно размещаются на площадке вблизи БПТВ.

Пары кипящего гелия из каждого сосуда отводятся в коллектор газосброса гибким резиновым шлангом, подсоединяемым к оборудованному запорными шаровыми кранами и присоединительными штуцерами.

Так как наддув сжатым гелием осуществляется по этому же шлангу, то возникла идея переделки штуцера в тройник с дополнительным шаровым краном, через который сжатый газ будет подаваться из дополнительного коллектора в сосуд.

Реализация предложенной идеи избавила от коммутаций шлангов газосброса при переливании жидкого гелия, связанных с неизбежными утечками газа в атмосферу.

Экономический эффект от внедрения предложенных идей выражается в существенной экономии на ожижении (более 600 л при каждом старте криогенного комплекса) и снижении утечек газообразного (несколько литров в сутки) гелия, а также упрощении технологических режимов гелиевой системы, а, следовательно, и стоимости её обслуживания.

#### 7.4.4. Прочее

К числу прочих технологических усовершенствований следует отнести существенное сокращение участков криогенных трубопроводов исходного проекта криогенной системы при её сборке (монтаже) и после проведённых криогенных испытаний с оценкой теплопритоков.

Под оптимизирующее сокращение попали и несколько криогенных сосудов:

- два азотных сосуда ( $2 \times 800$  л) высокого давления (2,5 МПа) для нагрева жидкого азота при термостатировании криптонового калориметра,

- два буферных хранилища ( $2 \times 1200$  л) жидкого гелия,
- сборник утечек жидкого криптона для калориметра.

В дополнение к исходному проекту были добавлены в систему электронные устройства:

- датчики температуры СП трансформатора,
- автоматический регулятор потока жидкого азота собственной разработки,
- описанный ранее автоматический контроллер детандера,
- датчики (ПМТ, ПММ-32, ПММ-46) и измерители вакуума (ВМБ-14, ВМБ-1/8),
- блоки управления вакуумными агрегатами (БУВА) собственной разработки,
- блоки питания насосов (БП-100, БПТ-1000),
- сборки питания и защиты вакуумных агрегатов собственной разработки.

К числу прочих нововведений, не предусмотренных исходным проектом, относятся:

- обратная продувка фильтров и трубопроводов рефрижератра,
- наддув полости утечек поршневого детандера,
- изготовление запасных поршневых пар детандера,
- и другие.

## Заключение

Основные **результаты** работы:

1. Создана система дистанционного управления в реальном времени криогенным комплексом детектора КЕДР.
2. Разработан простой программный графический интерфейс для наглядного мониторинга состояния криогенной системы и управления ею в реальном времени.
3. Проведены криогенные испытания всех систем криокомплекса детектора КЕДР.
4. Смонтирована и налажена электросистема управления криокомплексом детектора КЕДР, осуществлена настройка исполнительных устройств и калибровка измерительных преобразователей.
5. Создана локальная вычислительная сеть для организации надёжной работы системы управления криокомплексом, его информационного обмена с информационными серверами детектора КЕДР и сетью Интернет.
6. Изучена специфика криокомплекса детектора КЕДР, внесены доработки в структуру, разработаны и внедрены методики осуществления его технологических режимов.
7. Внесены различные изменения и дополнения в технологические схемы криогенного комплекса, позволившие упростить управление ним, а также снизить эксплуатационные издержки.
8. Осуществлены ряд модернизаций отдельных модулей управления, а также вычислительной платформы управляющей ЭВМ - с разработкой соответствующего программного обеспечения.
9. Созданы электронные приборы (контроллеры) и модули (в том числе в стандартах КАМАК и ВИШНЯ) для построения автоматизированных систем управления криогенными установками: контроллер



микропроцессорного управления агрегатом поршневого детандера, микропроцессорный контроллер для системы пневмоуправления, модуль программируемого генератора тока в стандарте КАМАК для питания криогенных датчиков температуры во всех диапазонах рабочих температур, 8-канальный модуль в стандарте ВИШНЯ для управления силовыми цепями приводов электромеханических криогенных клапанов и другие.

10. Доработаны газовая и электрическая системы дистанционного пневмоуправления регулируемыми и запорными пневмоприводными клапанами.
11. Достигнуты основные проектные параметры функционирования криогенного комплекса детектора КЕДР.
12. На основе созданной системы управления введён в действие криогенный комплекс детектора КЕДР и в течение более 15 лет обеспечивает надёжное функционирование жидкокриптонового калориметра и сверхпроводящих магнитов в цикле ведущихся и осуществлённых — по измерению с высокой или лучшей в мире точностью параметров целого ряда элементарных частиц:  $\tau$ ,  $J/\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\psi''$ ,  $D^0$ ,  $D^+$ ,  $D^-$  — экспериментов.

Автор благодарит всех, кто в течение многих лет способствовал организации работы, созданию и эксплуатации криогенного комплекса детектора КЕДР, его криогенных компонент, системы управления, а также всему авторскому коллективу [20], занятому в экспериментах с детектором КЕДР и ускорительным комплексом ВЭПП-4М.

Хочу отметить вклад в работу специалистов предприятия КРИОГЕНМАШ из г. Балашиха Московской области, в том числе К. В. Безрукова и И. М. Морковкина, а также из ИЯФ СО РАН: Г. М. Колачева, С. Г. Пивоварова, Ю. И. Ощепкова, С. В. Тарарышкина, Д. В. Дорохова, А. И. Белолипецкого, А. А. Рубана, Ю. В. Усова, А. П. Носова, Д. М. Фёдорова, А. Р. Бузыкаева, А. Г. Шамова, А. Б. Лобкова, Е. М. Балдина, Р. Г. Снопкова, С. В. Пелеганчука, А. Л. Масленникова, Г. А. Блинова, В. Ф. Куликова, С. П. Дёмина, И. В. Загородникова, И. В. Плюснина, команды операторов-технологов криокомплекса детектора КЕДР и криогенной станции, а также действенную организационную поддержку от В. В. Анашина, А. П. Онучина, Э. А. Купера, В. Е. Блинова, А. И. Шушаро, дирекции Института, академика А. Н. Скринского и Л. Л. Константиновой.

Работы по детектору КЕДР выполнены частично при финансовой поддержке грантов РФФИ и Минобрнауки России.

Диссертация выполнена благодаря научному руководству, всестороннему содействию и инициативе моего наставника — Юрия Анатольевича Тихонова.

Мои признательность и огромная благодарность всем!

## Литература

1. Грачев, А. Б. Получение и использование низких температур / А. Б. Грачев, Н. В. Калинин // М.: Энергоиздат, 1981.-128 с. : ил.
2. Режим доступа: <http://n-t.ru/nl/fz/kamerlingh.htm>, свободный.- Загл. с экрана.
3. Ventura, G. The Art of Cryogenics Low-Temperature Experimental Techniques / Guglielmo Ventura, Lara Risegari // Электрон. дан.- Режим доступа: частная коллекция файлов.
4. Филин, Н. В. Криогеника - этапы развития / Н. В. Филин.- Режим доступа: [http://www.holodilshchik.ru/index\\_holodilshchik\\_issue\\_2\\_2007\\_Kriogenika\\_Filin.htm](http://www.holodilshchik.ru/index_holodilshchik_issue_2_2007_Kriogenika_Filin.htm), свободный.- Загл. с экрана.
5. Контроль и управление криогенными гелиевыми установками / А. В. Абрамов [и др.] // Криогенное и вакуумное машиностроение. Сер. ХМ-6.- М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1984.- 40 с.
6. Баррон, Р. Ф. Криогенные системы / Р. Ф. Баррон // Пер. с англ.-2-е изд.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 408 с. : ил. ISBN 5-283-02431-8.
7. О построении циклов криогенных гелиевых установок на базе обратимых циклов. Пути повышения эффективности криогенных установок / С. М. Корсаков-Богатков [и др.] // Сер. ХМ-6. - М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1979.- N2.- 40 с.
8. Криогенные устройства для энергетики. Лекции (Электронная библиотека). Режим доступа: <http://85.142.23.144/packages/mifi/200356AC-31E4-47D5-99E8-E9E0E08ADC1C/1.0.0.0/file.pdf>, свободный.
9. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения / М. П. Малков [и др.]- М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.- 416 с. : с черт.

10. Некоторые вопросы аварийной защиты гелиевых криостатов / В. Д. Бартенев [и др.] // Препринт 8-84-248.- Дубна, 1984.- 11 с.
11. Мартин, Дж. Программирование для вычислительных систем реального времени / Дж. Мартин // Пер. с англ. В. П. Семиколенова под ред. Д. Ю. Панова.- М.:Наука, 1975.- 360 с. : ил.
12. Автоматизированная система контроля и управления системы криогенного обеспечения детектора КЕДР СТАГ-1200/120-120/4,5. Предварительные технические требования 2082 364224 0675 00 7 ТТ / Криогенмаш, 1985.
13. Алешаев, А. Н. Программное обеспечение для микроЭВМ ОДРЁНОК. Операционная система ОДОС / А. Н. Алешаев // Препринт ИЯФ 89-67.- Новосибирск, 1989.- 83 с.
14. Козак, В. Р. Драйвер и контроллер для ЭВМ ОДРЁНОК / В. Р. Козак // Препринт 88-24.- Новосибирск, 1988.- 13 с.
15. Нифонтов, В. И. Аппаратура для последовательной системы связи / В. И. Нифонтов, Ю. И. Ощепков, С. В. Тарарышкин // Препринт 90-25.- Новосибирск, 1990.- 27 с.
16. Абрамов, А. В. Автоматизированное управление системами криогенного обеспечения за рубежом / А. В. Абрамов, В. В. Плотников, И. Е. Дудкин // Криогенное и вакуумное машиностроение. Сер. ХМ-6.- М.:ЦИНТИхимнефтемаш, 1985.- 44 с.
17. Тельнов, В. И. Физика элементарных частиц и космология: на пороге великих открытий / В. И. Тельнов // Вестник НГУ. Сер.: физика.-Том 1, вып.2.-2006.-с.54-70. ISSN 1818-7994
18. Проект В-фабрики в Новосибирске / А. В. Александров [и др.] // Препринт 18-92.- Новосибирск, 1992.- 98 с.
19. Детектор КЕДР / В. В. Анашин [и др.]. // Препринт ИЯФ СО РАН 2010-40, Новосибирск, 2010.- 86 с.

20. Детектор КЕДР / В. В. Анашин, ... , А. К. Барладян [и др.] // Препринт ИЯФ 2010-40.-Новосибирск,2010.
21. ВЭПП-4М / Режим доступа: <http://v4.inp.nsk.su/vepp4>, свободный. - Загл. с экрана.
22. Ускорительный комплекс ВЭПП-4 / А. Н. Алешаев [и др. ] // Препринт ИЯФ 2011-20.-Новосибирск, 2011.
23. Review of beam energy measurements at VEPP-4M colider KEDR/VEPP-4M / V. E. Blinov [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A.-2009.-598-p.23.
24. Application of methods of accelerator physics in experiments on precision measurements of particle masses at the VEPP-4 complex with the KEDR detector / O. V. Anchugov [et al.] // Pribory i tehnika experimenta.-2010.-1-p.20.
25. Status of the KEDR detector / V. V. Anashin, ... , A. K. Barladyan [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A-2002.-478-p.420-425.
26. Детектор КЕДР / В.В.Анашин [и др.]. // ЭЧАЯ,-2013.-т.44, вып.4.-с.1263-1345 (принято в печать)
27. Система регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР для изучения двухфотонных процессов / В. М. Аульченко [и др.] // Препринт ИЯФ 91-49.-Новосибирск,1991.
28. Superconducting magnetic system of the detector KEDR / V. V. Anashin [et al.] // IEEE Trans. mag., - 1992.- vol.28- N1- p.578-580
29. Status of the KEDR superconducting magnet system / V. V. Anashin [et al.] // Nucl. Inst. and Meth. A 494.- 2002.- p.266-269
30. Status of the KEDR superconducting magnet system / V. V. Anashin, ... , A. K. Barladyan [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A.-2002.-494-p.266-269.
31. Пивоваров, С. Г. Сверхпроводящая магнитная система и жидкокритичный калориметр детектора КЕДР : автореф. дис...канд. техн. наук : 01.04.16 / Пивоваров Сергей Григорьевич.-Новосибирск, 2001.- 18 с.

32. The superconducting solenoid for the KEDR detector / V. V. Anashin [et al.] // IEEE Trans. on Appl. Supercond. - 2002.- Vol.12-N1.-p.337-340
33. The superconducting solenoid for the KEDR detector / V. V. Anashin, ... , A. K. Barladyan [et al.] // IEEE Transaction on Applied Superconductivity.-2002.-vol.12-N1-p.337-340.
34. Сверхпроводящий преобразователь для запитки магнитной системы детектора КМД-2 / Р. Р. Ахметшин [и др.] // Препринт ИЯФ 96-86. - Новосибирск, 1986.- 21 с.
35. Efferson, K. R. Helium vapor Cooler current leads / K. R. Efferson // Rev. Sci. Instr.- 1967.-vol.38, N12.- p.1776-1779
36. Блинов, В. Е. Детектор КЕДР / В. Е. Блинов // Энергия-Импульс: газета ИЯФ СО РАН.-2005.-N1-2.
37. Liquid krypton calorimeter for KEDR detector and last prototype results / V. M. Aulchenko, ... , A. K. Barladyan [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A.-1996.-379-p.475-477.
38. Liquid krypton calorimeter for KEDR detector / V. M. Aulchenko [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A.-1992.-316-p.8.
39. Investigation of electromagnetic calorimeter based on liquid krypton / V. M. Aulchenko [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A.-1990.-289-p.468.
40. Peleganchuk, S. V. Liquid gas calorimeters at Budkedr INP / S. V. Peleganchuk // Nucl. Instr. And Meth. A.-2009.-598-p.248.
41. Space and energy resolution in a liquid krypton e.m. Calorimeter / P. Cantoni [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A.-1992.-315-p.491.
42. Пространственное разрешение калориметра на жидком криптоне детектора КЕДР / В. М. Аульченко, ... , А. К. Барладян [и др.] // Препринт ИЯФ 2004-29.-Новосибирск, 2004.

43. High-accuracy measurement of photon position in a liquid krypton calorimeter / V. M. Aulchenko [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A.-1998.-419-p.602-608.
44. Пелеганчук, С. В. Энергетическое разрешение электромагнитного калориметра на основе жидкого криптона : автореф. дис...канд. физ.-мат. наук : 01.04.16 / Пелеганчук Сергей Владимирович.- Новосибирск, 1999.-20 с.
45. Liquid krypton calorimeter for the KEDR detector and last prototype results / V. M. Aulchenko [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A 379.- 1996.- p.475-477
46. The test of the LKr calorimeter prototype at the tagged photon beam / V. M. Aulchenko [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A 394.- 1997.- p.35-45
47. Investigation of an electromagnetic calorimeter based on liquid krypton / V. M. Aulchenko [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A 289.- 1990.- p.468-474
48. The test of the LKr calorimeter prototype at the tagged photon beam / V. M. Aulchenko [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A.-1997.-394-p.35-45.
49. Panin, V. S. Electronic noise and radioactivity in liquid krypton calorimeter / V. S. Panin, S. V. Peleganchuk // Siberian Physical Journal (in russian).-1995.-4-p.55-65.Aulchenko, V. M. Liquid krypton electromagnetic calorimeter / V. M. Aulchenko [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A.-1993.-327-p.193-198.
50. Panin, V. S. Radioactivity and electronic noise in liquid krypton calorimeter / V. S. Panin, S. V. Peleganchuk // Preprint Budker INP 95-26.-Novosibirsk,1995.
51. The test experiment with the prototype of LKr calorimeter at the tagged photon beam / V.M.Aulchenko [et al.] // Preprint Budker INP 95-96.-Novosibirsk,1995.
52. V. M. Aulchenko [et al.] // Proc. of the 24th Int. Conf. on High Energy Physics, Munich.-1988
53. V. M. Aulchenko [et al.] // Proc. of the 5th. Int. Conf. on Instr. for Colliding Beam Phys.-Novosibirsk,1990.-p.299.

54. V. M. Aulchenko [et al.] // Proc. Int. Conf. on Calorimetry at High Energy Phys., FNAL.-1990
55. Liquid krypton calorimeter / V. M. Aulchenko [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A.-1993.-327-p.193-198
56. Криостат криптоновый ККр-13. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2082 364238 3712 00 9 ТО / Криогенмаш, 1991.
57. Система криогенного обеспечения детектора КЕДР СТАГ-1200/120-120/4,5. Техническое описание 2082 364215 1017 00 2 ТО / Криогенмаш, 1991.-164 с.: черт.
58. Улыбин, С. А. Теплофизические свойства криптона и ксенона при низких температурах / С. А. Улыбин, Е. Е. Устюжанин // Криогенное и кислородное машиностроение. Сер. ХМ-6.- М.:ЦИНТИхимнефтемаш, 1978.- 49 с.
59. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона / Под ред. В.А.Рабиновича. - М.: Изд-во стандартов, 1976.-636 с., ил. (Серия: монографии)
60. Улыбин, С. А. Вязкость и теплопроводность гелия при температурах 2,5-500 К и давлениях 0,01-30 МПа. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ / С. А. Улыбин, В. И. Макарушкин //ТФЦ.- М.: ИВТАН,1981.- N3.-29.-128 с.
61. Термодинамические свойства гелия / В.В.Сычев [и др].- ГСССД, М.: Изд-во стандартов, 1984.-320с., ил. (Серия: монографии)
62. Термодинамические свойства азота / В.В.Сычев [и др]. - ГСССД.-М.: Изд-во стандартов, 1977.-352с., ил. (Серия: монографии)
63. Handbook of cryogenic engineering / Edited by John G. Weisend II.- 1998.- 504 p. ISBN 1-56032-332-9.
64. Режим доступа: <http://www.chemport.ru>, свободный
65. Система термостатирования азотная. Схема пневмогидравлическая принципиальная 2082 364211 8013 00 9 С3 / Криогенмаш, 1991.



66. Система термостатирования гелиевая СТГ-120/4,5. Схема пневмогидравлическая принципиальная 2082 364215 4013 00 1 СЗ / Криогенмаш, 1991.
67. Система хранения и выдачи жидкого азота. Схема пневмогидравлическая принципиальная 2082 364211 8012 00 2 СЗ / Криогенмаш, 1991.
68. Система хранения и выдачи жидкого криптона СХКр-40/0,6. Схема пневмогидравлическая принципиальная 2082 364215 0012 00 8 СЗ / Криогенмаш, 1991.
69. Система пневмоуправления. Схема пневмогидравлическая принципиальная 2082 364224 0602 00 9 СЗ / Криогенмаш, 1991.
70. Комплект оборудования утилизации газообразного гелия. Схема пневмогидравлическая принципиальная 2082 364228 0284 00 7 СЗ / Криогенмаш, 1991.
71. Криостат гелиевый КГ-0,3. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2082 364216 4014 00 5 ТО / Криогенмаш, 1991.
72. Блок питания токовых вводов. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2082 364216 4014 00 5 ТО / Криогенмаш, 1991.
73. Рефрижератор гелиевый РГ-1200/4,5. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2082 364213 4033 00 9 ТО / Криогенмаш, 1991.
74. Долягин, А. М. Исследование сателлитного гелиевого рефрижератора дроссельного типа / А. М. Долягин, Г. Г. Ходжибагиян // Препринт Р8-86-175.- Дубна, 1986.- 7 с.
75. Агапов, Н. Н. Термодинамический анализ и оптимизация криогенных гелиевых систем с сателлитными рефрижераторами / Н. Н. Агапов // Препринт 8-84-165.- Дубна, 1984.- 11 с.
76. Детандер ДПГ-4/2,5 ЭМК. Техническое описание и инструкция по эксплуатации КВ 2118 00 000 ЭМК ТО / Криогенмаш, 1984.-53 с.:черт.

77. Детандер поршневой ДПГ-9,5/25. Техническое описание и инструкция по эксплуатации КВ 2121.00.000 ТО / Криогенмаш, 1979.-90 с.
78. Резервуар РЦВ-63/0,5-1. Техническое описание 2082 364231 1341 ТО / Криогенмаш, 1991.
79. Испаритель. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2082 364212 9313 ТО / Криогенмаш, 1991.
80. Белов, С. В. Регенерация фильтров тонкой очистки / С. В. Белов, В. А. Ложкин, Н. Г. Приходько // Криогенное и вакуумное машиностроение. Сер. ХМ-6.- М.:ЦИНТИхимнефтемаш, 1983.-36 с.
81. Фильтры тонкой очистки криогенных жидкостей / С. В. Белов [и др.] // Криогенное и вакуумное машиностроение. Сер. ХМ-6.- М.:ЦИНТИхимнефтемаш, 1980.- 46 с.
82. Комплект приборного и электрического оборудования СКО КЕДР. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2082 364224 0620 00 7 ТО / Криогенмаш, 1991.
83. АСКУ СКО КЕДР. Таблицы аналоговых параметров 2082 364224 0675 00 7 ТБ1 / Криогенмаш, 1991.
84. АСКУ СКО КЕДР. Таблицы дискретных параметров 2082 364224 0675 00 7 ТБ2 / Криогенмаш, 1991.
85. АСКУ СКО КЕДР. Таблицы исполнительных устройств 2082 364224 0675 00 7 ТБ / Криогенмаш, 1991.
86. Контроллер поршневого детандера / А. К. Барладян, Д. В. Дорохов. С. В. Тарарышкин // Материалы конференции RUPAS06. Режим доступа: <http://>
87. Капица, П. Л. Детандерная установка для ожижения гелия / П. Л. Капица, И. Б. Данилов // Журнал технической физики- 1961.- Том.31- Вып.4- с.486-494
88. Режим доступа: <http://www.owen.ru>, свободный.
89. Режим доступа: <http://xforms-toolkit.org>, свободный.

90. Momjian, B. PostgreSQL: introduction and concepts / Bruce Momjian // Addison-wesley, 2001.-462 p. ISBN 0-201-70331-9
91. Режим доступа: [http://kedr.inp.nsk.su/ FOR\\_MEMBERS/ SOFTWARE/ KDB/ index.html](http://kedr.inp.nsk.su/ FOR_MEMBERS/ SOFTWARE/ KDB/ index.html), парольный.
92. Режим доступа: <http://root.cern.ch/drupal>, свободный