

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 539.1.08

ОПЫТ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА  
PHOS В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ALICE

© 2012 г. А. В. Курякин\*, Ю. И. Виноградов\*, Н. В. Завьялов\*, В. Т. Пунин\*, С. Т. Назаренко\*,  
Д. В. Будников\*, А. В. Мамонов\*, С. В. Фильчагин\*, А. Д. Тумкин\*, О. П. Вихлянец\*,  
А. Н. Вьюшин\*, С. А. Садовский\*\*, Ю. В. Харлов\*\*, М. Ю. Боголюбский\*\*

\* Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-Исследовательский Институт  
Экспериментальной Физики (РФЯЦ ВНИИЭФ), Саров, Россия

\*\* Государственный научный центр Российской Федерации – Институт физики высоких энергий  
(ГНЦ ИФВЭ), Протвино, Россия

Поступила в редакцию 04.04.2012 г.

В данной работе описывается система охлаждения электромагнитного калориметра PHOS в эксперименте ALICE на БАК в ЦЕРН. Чтобы достигнуть энергетического разрешения  $\Delta E/E \approx 1\%$ , PHOS эксплуатируется при температуре  $-25^\circ\text{C}$ , стабилизированной с точностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Указанные жесткие требования обусловили создание высокоточной и эффективной автоматизированной системы охлаждения, которая должна удалять тепло, выделяемое электроникой детектора, мониторировать распределение температуры в кристаллах и соответственно подстраивать тепловой поток, чтобы гарантировать температурную стабильность. Эта система, расположенная в шахте эксперимента, не доступна во время проведения эксперимента. Поэтому она должна удовлетворять очень строгим критериям надежности. Более того, эта система, должна функционировать и мониторироваться по удаленному доступу и быть интегрирована в общую систему контроля эксперимента ALICE. После более чем 18 месяцев практически непрерывной работы PHOS демонстрирует выполнение всех требований эксперименту, что позволило детектору достигнуть требуемых характеристик при измерениях p–p и Pb–Pb столкновений.

*Ключевые слова:* эксперимент ALICE, БАК, калориметр PHOS.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для экспериментальной установки ALICE [1] на Большом Адронном Коллайдере (БАК) [2] создан фотонный спектрометр PHOS (PHOton Spectrometer) [3], предназначенный для регистрации  $\gamma$ -квантов высоких энергий и оснащенный системой охлаждения и температурной стабилизации (СОТС).

PHOS является электромагнитным калориметром, состоящим (в настоящее время) из трех модулей на основе матриц из  $64 \times 56$  кристаллов вольфрамата свинца  $\text{PbWO}_4$  (PWO) [4] с размерами каждого кристалла  $22 \times 22 \times 180$  мм. Каждый модуль имеет 3584 каналов регистрации данных, а полное количество каналов спектрометра – 10752. Общий объем кристаллов PWO в трех модулях  $\approx 0.93 \text{ м}^3$ , а масса  $\approx 7.5$  т.

Кристаллы PWO (рисунок 1а) служат сцинтилляторами для регистрации электромагнитных ливней. Измерение их светового выхода осуществляется с помощью лавинных фотодиодов (APD) с внутренним усилением типа Hamamatsu S8148/S8664-55, приклеенных прозрачным клеем к торцу кристаллов. Сигналы APD усиливаются

малошумящими интегрирующими предусилителями [5], проходят через формирователь с электронным фильтром и оцифровываются регистрирующей электроникой (FEE – front end electronics) [6]. Оцифрованный сигнал передается по сети в систему сбора данных для обработки.

Одной из важных особенностей кристаллов PWO является сильная зависимость световыхода от температуры [7]. При охлаждении от  $+20^\circ\text{C}$  до температуры  $-25^\circ\text{C}$  световыход кристаллов PWO увеличивается в  $\approx 2.75$  раз (рисунок 1б), а температурный коэффициент световыхода составляет в среднем  $\approx -2.3\%$  на  $1^\circ\text{C}$ . Температурная зависимость усиления APD имеет коэффициент того же порядка. По этим причинам к системе охлаждения предъявлялись следующие требования [8]. Для достижения необходимой точности измерения энергии фотонов и получения требуемого по условиям эксперимента ALICE энергетического разрешения спектрометра PHOS  $E/E \approx 1\%$ , рабочая температура в матрице кристаллов PWO должна поддерживаться на уровне  $-25^\circ\text{C}$ , и стабилизироваться с высокой точностью не хуже  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , а измеряться с точностью не хуже  $\pm 0.02^\circ\text{C}$ .

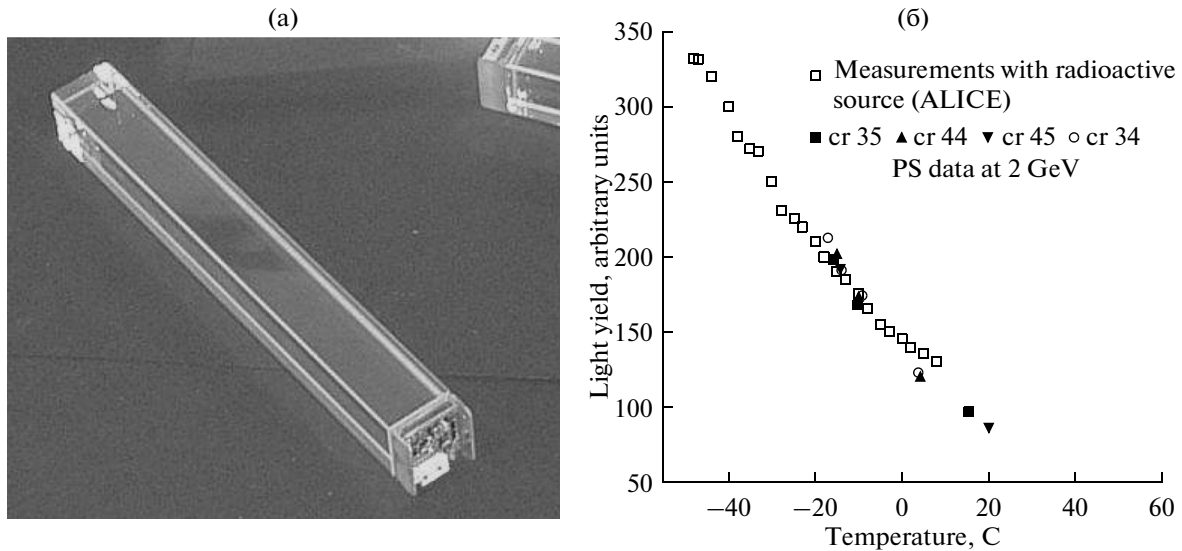


Рис. 1. Внешний вид кристаллов PWO с предусилителем на торце (а) и график зависимости светового выхода кристаллов PWO от температуры (б).

Для обеспечения необходимого температурного режима матриц кристаллов в модулях была создана высокоавтоматизированная система охлаждения и температурной стабилизации (СОТС). Рассмотрим несколько подробнее конструктивные особенности модуля и задачи решаемые СОТС. Матрица кристаллов PWO собирается из линеек – сборочных единиц из  $8 \times 2$  кристаллов с фотодиодами и предусилителями. Линейки установлены в верхней части модуля в так называемом “холодном объеме” на опорной раме, окруженной по бокам панелями охлаждения, обеспечивающими охлаждение матрицы до рабочей температуры. В нижней части модуля, в так называемом “теплом объеме” устанавливается регистрирующая FEE электроника, отделенная от линеек слоем теплоизоляции. Снаружи модуль также теплоизолирован и помещен в герметичный корпус, через который пропускается поток сухого азота, чтобы избежать конденсации влаги из воздуха.

СОТС осуществляет охлаждение матрицы кристаллов до рабочей температуры  $-25^{\circ}\text{C}$  и стабилизацию этой температуры с точностью  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . Она обеспечивает также отвод тепла от регистрирующей электроники, в первую очередь от предусилителей и фотодиодов, расположенных в холодном объеме вместе с кристаллами PWO. При мощности  $\approx 75$  мВт на канал предусилители выделяют в холодном объеме  $\approx 270$  Вт на модуль. Тепло выделяется также в теплом объеме FEE электроникой. Частично оно снимается с помощью специальной водяной системы охлаждения [9], работающей при давлении ниже атмосферного, что исключает попадание охлаждающей воды на электронные платы. Кроме того, значительная часть тепла поступает из внешней среды за счет

теплопередачи через теплоизоляцию, как самих модулей, так и трубопроводов общей длиной более 40 метров. Наконец, используемые для перекачки теплоносителя насосы выделяют  $\approx 1.5$  кВт тепла и охлаждаются протекающим теплоносителем. По оценке, сделанной на основании паспортной холодопроизводительности и фактической загрузки компрессоров СОТС, суммарная мощность, которую необходимо снимать для поддержания рабочей температуры матрицы, составляет  $\approx 5.7$  кВт, или  $\approx 1.4$  кВт на модуль.

СОТС также решает задачу высокоточных ( $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ ) измерений температуры теплоносителя, распределения температуры в матрицах PWO, температуры и влажности в теплом и холодном объеме модулей, а также другие измерения, необходимые для диагностики работы детектора и предотвращения опасных режимов его работы.

Система создана для длительной непрерывной работы в шахте, при отсутствии доступа к оборудованию, полностью автоматизирована и включена в общую систему управления DCS (detector control system) эксперимента ALICE [10]. Она обеспечивает автоматическую диагностику оборудования, удаленное оповещение операторов при выходе параметров за пределы рабочего режима, а также автоматическую блокировку при возникновении опасных для оборудования режимов работы.

СОТС установлена в шахте UX25 и введена в эксплуатацию в октябре 2009 года. Она отработала более 20 месяцев в непрерывном режиме, обеспечивая необходимую точность  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  стабилизации рабочей температуры кристаллов детектора PHOS в экспериментах на встречных протонных

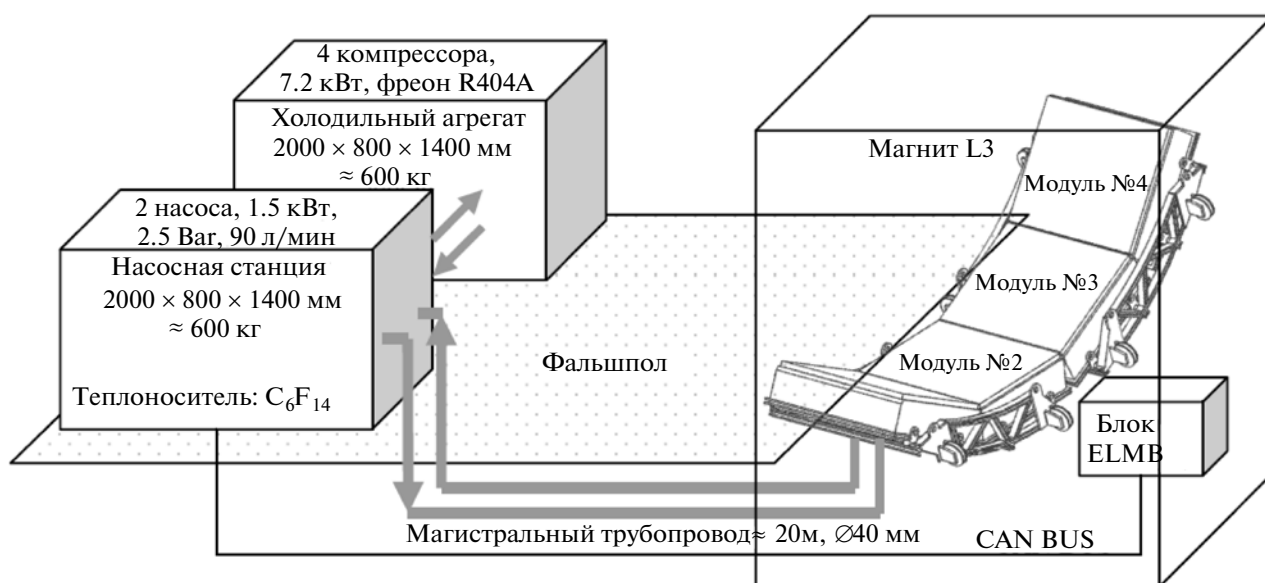


Рис. 2. Блок – схема системы охлаждения детектора PHOS.

и ионных пучках ЛНС. Накопленный опыт создания и эксплуатации СОТС может быть полезен при создании других систем охлаждения и высокоточной стабилизации температуры для физических экспериментов.

## 2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СОТС

Спектрометр PHOS расположен в шахте UX25 внутри магнита L3, в ограниченном пространстве, в условиях сильного ( $\approx 0.5$  Тл) постоянного магнитного поля и радиационного излучения. Поэтому система охлаждения расположена отдельно, на расстоянии  $\approx 20$  м от детектора, а производимый холод переносится к детектору с помощью теплоносителя.

Блок-схема СОТС изображена на рисунке 2. Холодильный агрегат служит для производства холода и стабилизации температуры теплоносителя, внутри него также находится управляющий компьютер и блок автоматики. Насосная станция обеспечивает хранение теплоносителя в ресивере и его поток по трубопроводам. Магистральный трубопровод переносит теплоноситель к охлаждаемым модулям. В магните L3 находится блок ELMB, предназначенный для измерения показаний датчиков температуры и влажности, расположенных в модулях – в зоне FEE электроники и в матрице кристаллов PWO.

Холодильный агрегат имеет холодопроизводительность  $\approx 7.2$  кВт и работает с фреоном R404A, хранящимся в ресивере. Из ресивера фреон через жидкостный фильтр и соленоидный клапан поступает в электронный терморегулирующий вентиль (ТРВ) марки EX4, управляемый интеллекту-

альным контроллером EC3-X33 “Alco”, который регулирует расход фреона для поддержания выбранной температуры перегрева в испарителе 15 К. Охлажденный фреон поступает в теплообменник марки WP5-AE “GEA WTT GMBH”, охлаждая протекающий теплоноситель, и поступает во всасывающий коллектор, где установлен датчик давления в испарителе. Четыре компрессора спирального типа марки ZF 09K4E-TFD “COPELAND”, имеющие производительностью по холоду  $\approx 1.8$  кВт, откачивают фреон в нагнетательный коллектор, откуда сжатый фреон попадает в фильтр для отделения масла. Съем тепла с нагнетательного контура обеспечивает конденсатор водяного охлаждения “Bitzer”, подключенный к водяной магистрали CERN. Для регулирования потока воды через конденсатор используется механический клапан, открывающийся при повышении давления фреона в нагнетательном контуре выше порогового значения  $\approx 12$  Бар. Используется также холодильная автоматика и арматура компаний “Sporlan”, “Parker”, “Alco”, “KMP”, “Danfoss”, включая регуляторы давления конденсации и приборы защиты компрессоров. Соединения составных частей выполнены медными трубопроводами. В холодильном агрегате установлен высоконадежный управляющий промышленный безвентиляторный компьютер марки NISE 3100 “NEXCOM”, а также электронный блок автоматического управления на базе модулей серии I-7000 “ICP DAS”, который осуществляет контроль датчиков (температур, давлений, уровня и потока жидкости) и управляет всеми исполнительными устройствами (компрессорами, насосами, нагревателями, клапанами, ТРВ). Для

управляющего компьютера и блока управления предусмотрено бесперебойное питание ~220 В, обеспечивающее не менее 15 минут их автономной работы.

В качестве теплоносителя в СОТС используется флюорокарбон (Fluorocarbon) типа  $C_6F_{14}$  “3M Industry”. Это прозрачная нетоксичная жидкость без цвета и запаха, с высокой радиационной стойкостью, нулевым озонразрушающим потенциалом. Кинематическая вязкость  $C_6F_{14}$  при рабочей температуре  $-30^{\circ}C$  (0.9354 сСт) сравнима с вязкостью воды при температуре  $+20^{\circ}C$ . Объем заливаемого в систему охлаждения теплоносителя 162 литра общей массой около 275 кг. К недостаткам флюорокарбона можно отнести высокий коэффициент температурного расширения, из-за которого объем жидкости при охлаждении от  $+20$  до  $-30^{\circ}C$  уменьшается на  $\approx 13$  литров, а также легкую испаряемость, требующую герметизации контура теплоносителя.

Насосная станция включает следующие элементы. Ресивер емкостью 65 литров служит для хранения теплоносителя. В нем установлен резистивный датчик температуры типа Pt-100 марки HEL-705 “Honeywell” и емкостной датчик уровня жидкости марки LLS “OmniCOMM”, а также защитный клапан на давление 0.3 Бар, чтобы избежать перепадов давления при охлаждении и отоплении теплоносителя из-за температурного эффекта. Теплоноситель прокачивается центробежными электронасосами марки ГЦ 6,3/32-2,2-2(5) “Молдовагидромаш”. В станции установлено два насоса, работающие попеременно, по 8 часов. В случае отказа одного из насосов, станция может функционировать на другом. К недостаткам насосов данного типа можно отнести то, что они охлаждаются протекающей жидкостью и отнимают около 1.5 кВт мощности холодильного агрегата. После насосов теплоноситель проходит через жидкостный фильтр и электромагнитный клапан и поступает по трубопроводам в теплообменник, расположенный в холодильном агрегате. Там он охлаждается, а затем подается в узел измерения температуры в насосной станции объемом 5 литров, где установлены контрольные датчики  $T_1$ ,  $T_2$  типа Pt-100 марки HEL-700 “Honeywell”, используемые в цепи обратной связи системы температурной стабилизации как основной и резервный. Далее теплоноситель уходит в магистраль к охлаждаемым модулям, откуда возвращается в ресивер. Электронный блок управления насосной станции, связанный с блоком управления холодильного агрегата, обеспечивает электрическое подключение датчиков, клапана и насосов к системе автоматизированного управления.

Блок ELMB включает в себя 6 карт ELMB [11], каждая из которых содержит 64 канала регистрации. Эти карты, подключаемые через помехо-

устойчивый интерфейс CAN BUS, используются для регистрации показаний датчиков температур (по 3 датчика Pt-100 и по 29 датчиков Ni-100 на каждый модуль) и влажностей (по 5 датчиков влажности НТМ2500 “Humirel” на модуль).

### 3. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ СОТС

СОТС в силу высокой сложности и особенностей условий эксплуатации требует высокого уровня автоматизации, а также удаленного наблюдения и управления. Решение этих задач обеспечивается многоуровневой автоматизированной системой управления (АСУ), блок-схема которой показана на рисунке 3.

Нижний уровень управления, соответствующий физическим устройствам, сосредоточен на управляющем компьютере с сетевым именем alidscsom252, к которому по интерфейсам RS-232, RS-485, Ethernet, CAN BUS подключены электронные блоки холодильного агрегата и насосной станции, ТРВ и ELMB карты. На этом компьютере работает управляющая программа AliPhosCool, графический интерфейс которой показан на рисунке 4. Она создана в инструментальном пакете CRW-DAQ [12, 13] и исполняет роль WEB и DIM сервера, публикующего данные СОТС для передачи на верхний уровень и принимающего сверху управляющие команды. Протокол DIM [14] разработан в CERN и является одним из основных протоколов обмена данными, принятым в эксперименте ALICE. Все устройства нижнего уровня расположены в шахте UX25, куда доступа во время сеанса нет, поэтому все наблюдение и управление системой осуществляется только по сети.

На промежуточном уровне, в комнате CR3 с ограниченным доступом, расположены компьютеры DCS, работающие под управлением коммерческой системы визуализации и управления PVSS II [15] фирмы ETM [16]. Среди них находится компьютер с именем alidscsom072, на котором работает DIM клиент, принимающий данные от нижнего уровня по протоколу DIM и преобразующий их для использования в системе PVSS II.

На верхнем уровне, в комнате ACR, находятся операторские компьютеры, через которые дежурный персонал осуществляет наблюдение и управление экспериментом. Основным режимом наблюдения данных СОТС является использование на операторском компьютере графического интерфейса (GUI), работающего под PVSS II и берущего данные с компьютера PVSS II промежуточного уровня. Оператор может также наблюдать данные СОТС прямо с компьютера нижнего уровня по протоколу HTTP через WEB обозреватель. Это безопасный режим наблюдения, т.к. управление через WEB сервер недоступно. Наконец, можно запустить на операторской машине

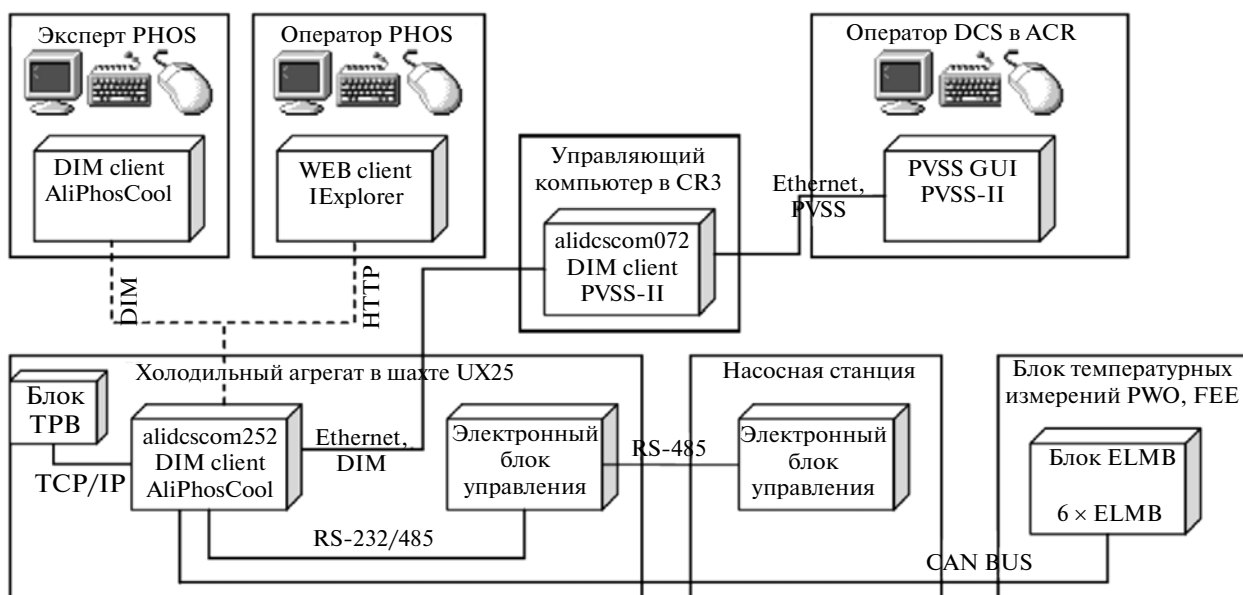


Рис. 3. Блок – схема автоматизированной системы управления COTS.

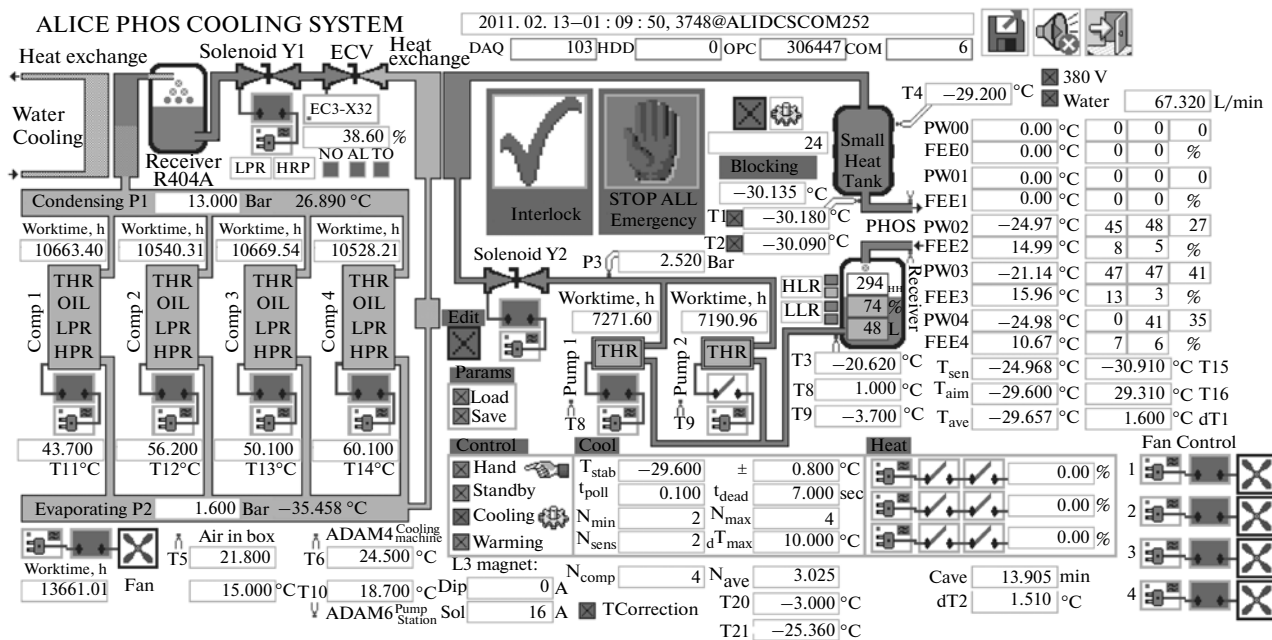


Рис. 4. Внешний вид главной мнемосхемы управляющей программы AliPhosCool.

клиентскую программу AliPhosCool, работающую как DIM клиент и принимающую данные с компьютера нижнего уровня. Этот способ предназначен только для экспертов по системе охлаждения.

Электронные блоки управления реализованы на базе модулей серии I-7000 “ICP DAS”, связанных с управляющим компьютером alidscscom252 по интерфейсу RS-232/485. Блок управления в холодильном агрегате содержит 8 модулей, блок

управления в насосной станции содержит 3 модуля, среди которых есть цифровые регистры I-7043, I-7053, многоканальные АЦП I-7017, I-7018, преобразователь интерфейса I-7520.

Автоматизированная система управления COTS имеет в сумме более 175 каналов регистрации. Среди них 15 датчиков температуры Pt-100 в холодильном агрегате и насосной станции, 3 датчика давления фреона, более 110 датчиков

температуры Pt-100 и Ni-100 в модулях детектора, 15 датчиков влажности, датчики уровня и потока теплоносителя. 5 каналов регистрации связано с электронным блоком ТРВ. Значительное число каналов служит для системы блокировки. Так, каждый из 4-х компрессоров снабжен 4-мя реле блокировки, срабатывающих по низкому и высокому давлению, низкому уровню масла, перегрузки по току.

Кроме того, автоматизированная система имеет более 20 каналов управления. Среди них каналы для управления 2-мя клапанами, 4-мя компрессорами, 2-мя насосами, 3-мя нагревателями, 8-ю вентиляторами воздушного охлаждения, реле внешней блокировки Interlock.

СОТС эксплуатируется в длительном непрерывном режиме без постоянного наблюдения со стороны операторов, поэтому особое внимание уделялось обеспечению отказоустойчивости. Для этого управляющая программа AliPhosCool имеет развитую систему блокировок, включающую 37 возможных условий блокировки, а также систему экстренного аварийного оповещения экспертов путем рассылки электронных писем. Например, при повышении давления фреона в конденсаторе выше порога возникает блокировка компрессоров, т.к. дальнейшая их работа становится опасной. Блокировки также возникают при перегреве корпусов компрессоров и насосов, низком уровне теплоносителя в ресивере, низком давлении фреона в контуре охлаждения или теплоносителя в магистрали, разрыве связи с контроллером ТРВ и электронными блоками управления, отсутствии силового питания  $\sim 380$  В и ряде других условий.

Управляющий компьютер и электронный блок управления питаются от отдельного источника бесперебойного питания (ИБП), гарантирующего 15 минут автономной работы. При длительном отсутствии силового питания система блокировки автоматически делает рассылку электронных писем экспертам системы охлаждения и завершает работу управляющего компьютера, чтобы избежать его повреждения из-за разряда батареи ИБП.

Для обеспечения высокой точности регистрации при подключении всех резистивных датчиков температуры использовалась 4-х проводная схема подключения, обеспечивающая компенсацию помех на сигнальных кабелях, малую чувствительность к дрейфу нуля АЦП и высокую стабильность во времени. При настройке АСУ особое внимание уделялось вопросам калибровки датчиков температуры. Разброс показаний датчиков после калибровки не превышал  $\pm 0.02^\circ\text{C}$ .

#### 4. АЛГОРИТМ И КАЧЕСТВО СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Принцип стабилизации температуры СОТС состоит в периодическом включении и отключе-

нии компрессоров по сигналу обратной связи от датчика  $T_1$  температуры теплоносителя в магистральном трубопроводе. Система имеет 6 настроечных параметров: целевую температуру стабилизации теплоносителя  $T_{stab}$ , температурный коридор регулирования  $\Delta T$ , минимальное  $N_{min}$  и максимальное  $N_{max}$  число рабочих компрессоров, температура  $T_{overheat}$  перегрева ТРВ и давление  $P_1$  фреона в нагнетательном коллекторе. Алгоритм работает следующим образом. Когда температура  $T_1$  контрольного датчика выше порогового значения  $T_{on} = T_{stab} + \Delta T$ , то включается  $N_{max}$  компрессоров и начинается охлаждение теплоносителя. При понижении  $T_1$  ниже порога  $T_{off} = T_{stab} - \Delta T$  работает  $N_{min}$  компрессоров и теплоноситель отепляется. В результате возникает устойчивый динамический цикл регулирования, период которого зависит от коридора  $\Delta T$ . При этом, хотя мгновенное значение температуры теплоносителя периодически меняется, но среднее по периоду регулирования значение  $T_1$  поддерживается с высокой точностью. Описанный принцип стабилизации температуры допустим, поскольку детектор PHOS имеет большую массу и все колебания температуры эффективно интегрируются. Для стабильности температуры матрицы PWO важно лишь обеспечить стабильное значение средней по периоду температуры  $T_1$ .

При выборе параметров алгоритма учитывались следующие факторы. Температура стабилизации  $T_{stab}$  должна быть на  $\approx 5^\circ\text{C}$  ниже рабочей температуры матрицы кристаллов, т.к. между матрицей и охлаждающими панелями есть слой теплоизоляции, служащий для уменьшения температурного градиента в матрице. Параметры  $N_{min}$  и  $N_{max}$  выбираются так, чтобы при этих значениях шло устойчивое отепление и охлаждение, соответственно. Параметр  $\Delta T$  выбирался так, чтобы получить устойчивый цикл регулирования с периодом около 15 минут. Температуру  $T_{overheat}$  перегрева ТРВ фреона в испарителе поддерживает интеллектуальный контроллер ТРВ, приоткрывая электронный вентиль на необходимую величину для обеспечения нужного потока фреона. При выборе температуры перегрева путем сканирования в диапазоне 10–18 К была найдена оптимальная точка (15 К), в которой для поддержания требуемой температуры требовалась минимальная (в среднем) загрузка компрессоров, при которой не появлялся сигнал блокировки “низкий уровень масла”, служащий косвенным признаком избыточного потока фреона. Давление  $P_1$  фреона в нагнетательном коллекторе регулировалось подстройкой механического пружинного клапана на воду. Этот клапан был настроен на полное открывание при давлении  $\approx 12$  Бар, что соответствует температуре конденсации фреона  $\approx 25^\circ\text{C}$ . При этом расход воды через радиатор водяного охла-

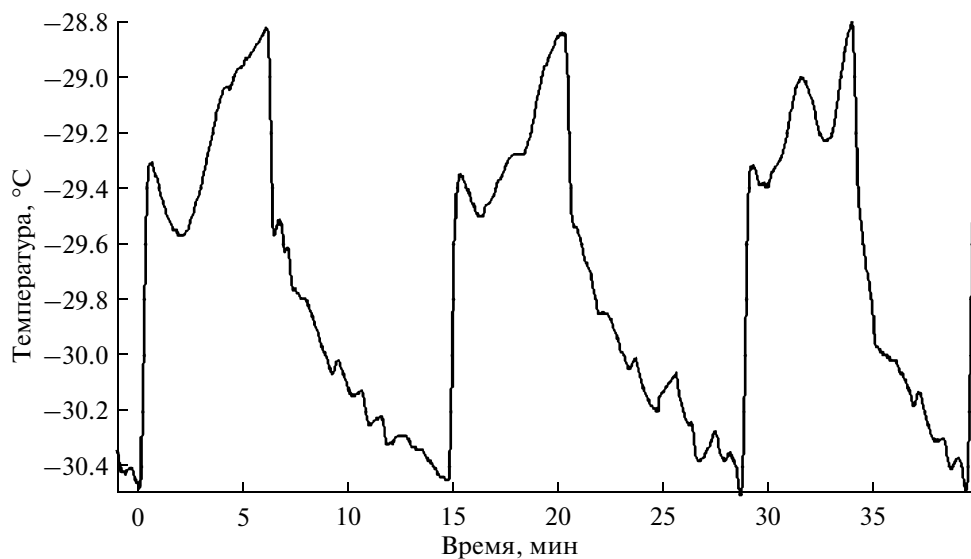


Рис. 5. График температуры  $T_1$  теплоносителя в цикле регулирования.

ждения составляет  $\approx 70$  литров в минуту. Надо заметить, что процесс тонкой настройки параметров имеет значительную длительность. Например, каждая точка при оптимизации перегрева ТРВ или при выборе температурного коридора  $\Delta T$  требует не менее суток измерений, чтобы получить статистически значимое число циклов регулирования для надежной оценки средней загрузки компрессоров за цикл. По этой причине оптимизация параметров системы производилась поэтапно и заняла более 2 месяцев.

Типичными значениями параметров регулирования, которые применялись в сеансе 2011 года, были следующие:  $T_{stab} = -29.7^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 0.8^\circ\text{C}$ ,  $N_{min} = 2$ ,  $N_{max} = 4$ ,  $T_{overheat} = 15$  К. При этом цикл регулирования имел период  $\approx 14.5$  минут. Давление фреона во всасывающем коллекторе  $P_2$  меняется в цикле регулирования от 1.4 до 1.9 Бар, что соответствует температуре фреона от  $-38$  до  $-31^\circ\text{C}$ . Давление в нагнетательном коллекторе  $P_1$  меняется от 11.9 до 13.3 Бар, что соответствует температуре конденсации от 24 до  $28^\circ\text{C}$ .

В процессе настройки было замечено, что форма кривой температуры  $T_1$  теплоносителя в цикле регулирования имеет сложный, немонотонный вид (рисунок 5). Причиной тому служит наложение двух процессов — цикла работы компрессоров и циркуляции теплоносителя в контуре охлаждения детектора. При общем объеме теплоносителя 162 литра и расходе 90 литров в минуту средний цикл переноса жидкости занимает  $\approx 1.8$  минут. При этом из-за охлаждения теплоносителя в теплообменнике и его нагрева в охлаждаемых модулях температура теплоносителя в разных частях объема жидкости может существенно отличаться, что и приводит при цир-

куляции к дополнительным колебаниям температуры. Это вносит некоторые затруднения в работу алгоритма регулирования и приводит к нестабильности цикла при небольших (менее  $0.5^\circ\text{C}$ ) значениях температурного коридора  $\Delta T$ .

При выбранных для работы в сеансах 2009/2010 и 2011 года параметрах цикл регулирования был стабильным, и алгоритм стабилизации работал устойчиво. В качестве примера на рисунке 6 приведен обзорный график температуры в матрице кристаллов РВО в модуле № 2 за период с 01.10.2009 по 16.07.2011 (всего 654 дня).

С 12.10.2009 в течение 9 дней, шло охлаждение детектора от комнатной температуры до рабочей температуры  $-25^\circ\text{C}$ . Длительный срок охлаждения связан с несколькими причинами. Во-первых, кристаллы РВО хрупкие и могут расколоться при «тепловом ударе», если в матрице кристаллов возникнет значительный градиент температуры. Во-вторых, при охлаждении контролировался рост влажности воздуха в модулях, и охлаждение приостанавливалось, если относительная влажность становилась выше 50%, во избежание конденсации влаги. При этом продувка модулей азотом приводила к замещению влажного воздуха сухим азотом, и модули постепенно осушались, после чего процесс охлаждения продолжался.

В период с 21.10.2009 по 03.11.2010 модуль находился в рабочем режиме стабилизации при  $-25^\circ\text{C}$ , во время которого выполнялись физические измерения на протонных и ионных Рb–Рb пучках [17, 18, 19, 20] различных энергий (0.9, 2.76, 7 TeV). На графике видно, что время от времени наблюдалось кратковременное (от нескольких часов до суток) снижение температуры на величину до  $3^\circ\text{C}$ . Это связано с временными отключениями пи-

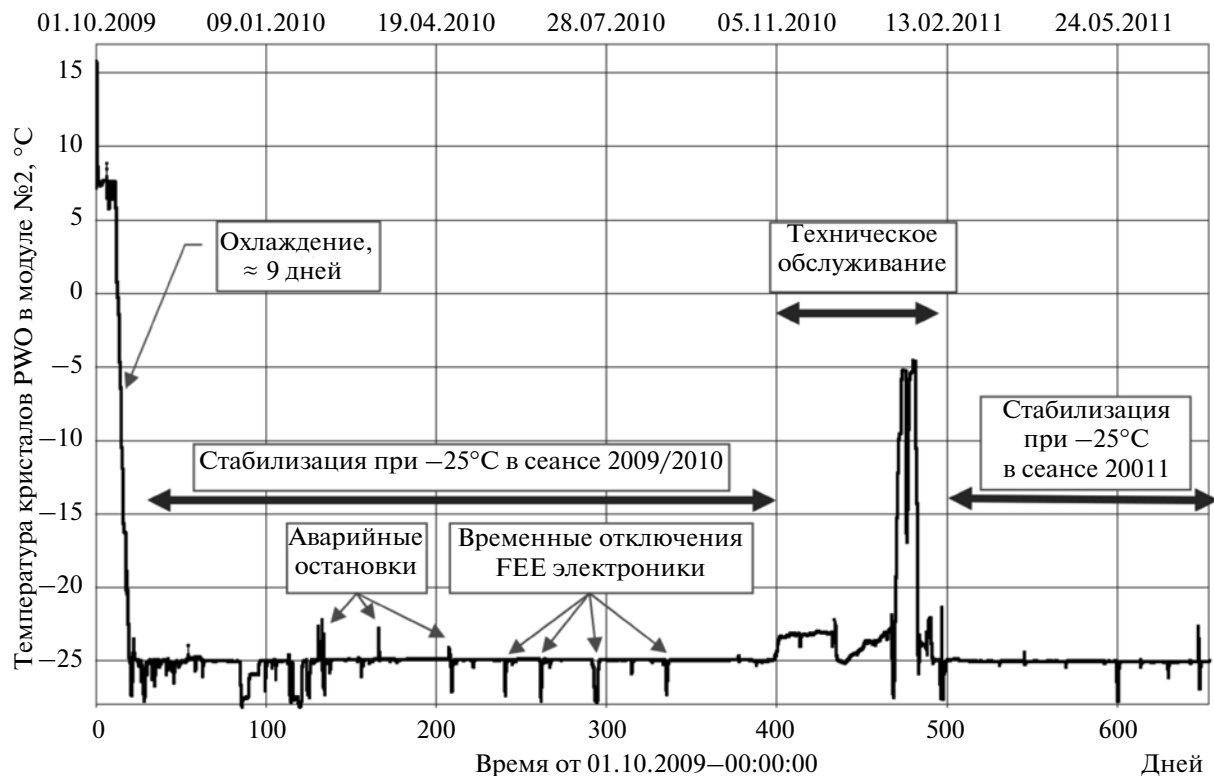


Рис. 6. Обзорный график зависимости значений температуры кристаллов PWO в модуле № 2 от времени в сеансах 2009/2010 и 2011 года.

тания FEE электроники, происходившими по причинам, не зависящим от СОТС. При этом тепловыделение детектора резко падало, что и приводило к изменению температуры. При включении электроники температура в течение 4–20 часов возвращалась в заданный рабочий коридор. Надо заметить, что после восстановления происходит довольно длительная процедура включения и проверки работы FEE электроники, поэтому влияние временного понижения температуры на физические измерения детектора было минимальным.

Кроме того, несколько раз за время работы происходили аварийные остановки системы охлаждения, при которых температура в матрице кристаллов PWO временно повышалась на величину до 3°C. Аварийные остановки происходили по причине технических сбоев за пределами СОТС. Один раз система была остановлена из-за отсутствия воды в сети CERN, необходимой для конденсатора водяного охлаждения. Несколько остановок происходило из-за общего аварийного отключения электроэнергии в CERN. После устранения причин отключения и восстановления питания система охлаждения запускалась автоматически и продолжала работу в штатном режиме. Во время отключений питания управляющий компьютер выключался штатным образом по блокировке,

т.к. компьютер и электронный блок управления питается от ИБП, гарантирующего 15 минут их автономной работы. Это позволяло компьютеру осуществить автоматическое оповещение экспертов путем рассылки писем по электронной почте и нормально завершить работу.

В период с 03.11.2010 по 13.02.2011 проводилось техническое обслуживание детектора и системы охлаждения. Физические измерения в это время не происходили, поэтому стабилизация температуры не требовалась. Во время технического обслуживания производилась замена компрессорного масла, фреона, масляных и жидкостных фильтров, регулировка клапана на воду, установка дополнительных датчиков и другие работы.

С 13.02.2011 по настоящее время идет сеанс физических измерений 2011 года. Как видно из графика, в сеансе 2011 года работа системы стала более стабильной – отключения и остановки происходили реже, а точность стабилизации температуры оказалась выше. В значительной мере это улучшение связано с результатами технического обслуживания и тонкой настройки параметров управления системой охлаждения.

На рисунке 7 приведены гистограммы распределения значений температуры кристаллов в матрице PWO модуля № 2 в сеансах 2009/2010 и 2011 года. При построении гистограмм были исключены пе-



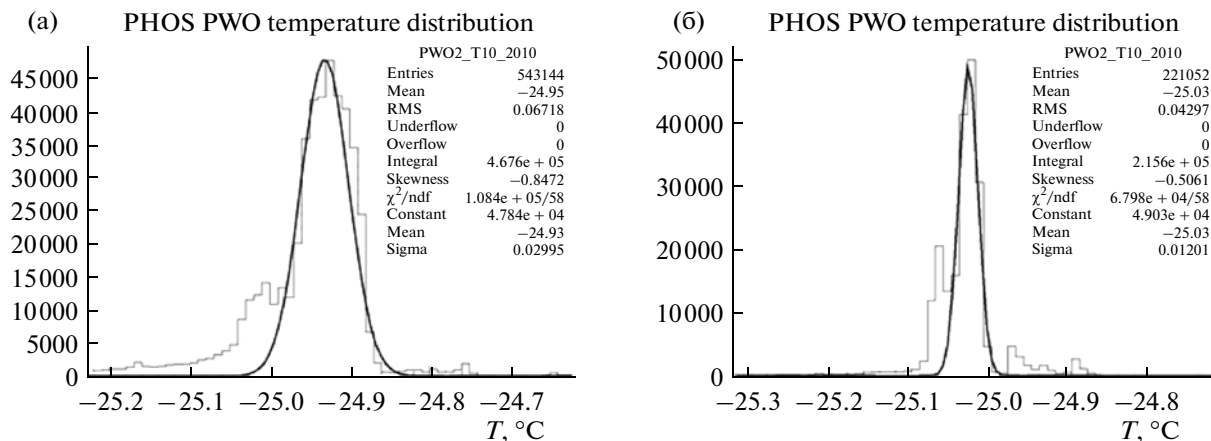


Рис. 7. Гистограммы распределения значений температуры кристаллов PWO модуля № 2 в сеансе 2009/2010 года (слева) и в сеансе 2011 года (справа).

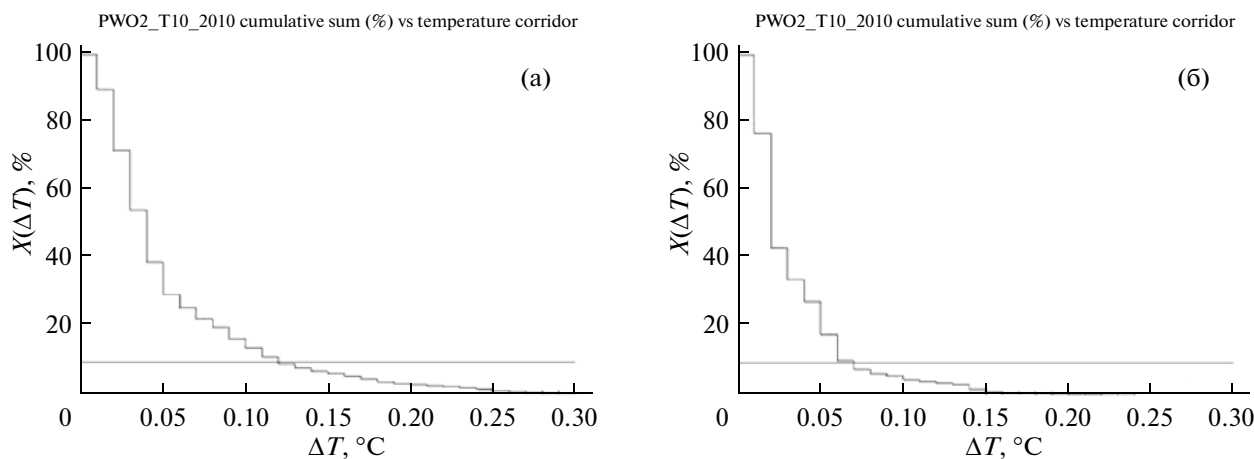


Рис. 8. Графики накопленной суммы  $X(\Delta T)$  относительного времени работы (в процентах) в зависимости от коридора температуры  $\Delta T$  для кристаллов PWO модуля № 2 в сеансе 2009/2010 года (а) и в сеансе 2011 года (б).

риод подготовки, охлаждения и технического обслуживания, когда физические измерения не происходили. В качестве значений температуры при построении гистограмм взяты измерения температуры  $T_{10}$  по контрольному датчику Pt-100 № 10 в разные моменты времени с шагом 1 минуту, проинтегрированные по интервалу 1 минута, поэтому счет в каждом канале гистограммы равен времени в минутах, в течение которого температура имела значение в диапазоне, соответствующем этому каналу.

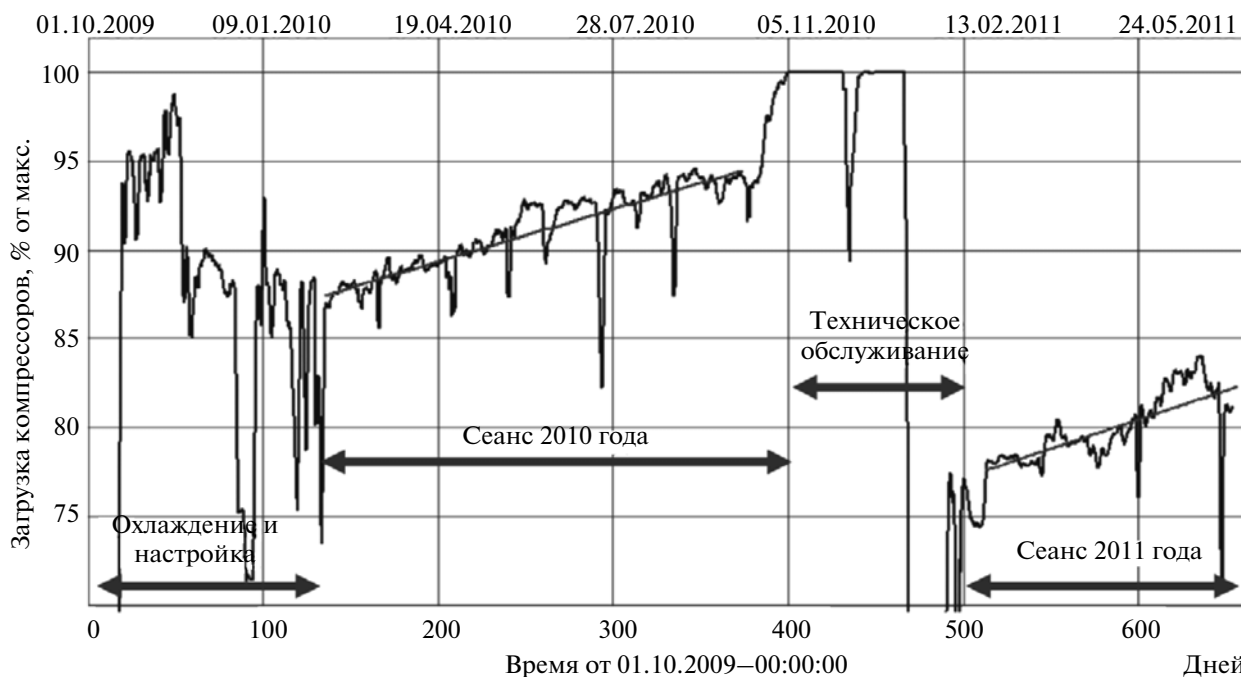
Как видно из рисунка 7, температура матрицы кристаллов составила  $-24.95 \pm 0.07^\circ\text{C}$  в сеансе 2009/2010 года и  $-25.03 \pm 0.04^\circ\text{C}$  в сеансе 2011 года. Хвост распределения в сторону низких температур связан с периодами временного отключения FEE электроники, когда тепловыделение в модуле резко падало, что приводило к охлаждению кристаллов ниже заданной температуры. Хвост рас-

пределения в сторону высоких температур связан со временем восстановления после аварийных остановок системы охлаждения, происходивших в большинстве случаев в связи с общим отключением электропитания в CERN. Заметим, что эти хвосты не могли существенно повлиять на результаты физических измерений детектора PHOS, т.к. при отключенной электронике измерения не велись.

На рис. 8 приведены графики относительного накопленного времени  $X(\Delta T)$  работы (в процентах от общего времени работы) в зависимости от температурного коридора  $\Delta T$  вокруг среднего значения температуры. Эта величина  $X(\Delta T)$  рассчитана как

$$X(\Delta T) = \frac{T(-\infty, +\infty) - T(c - \Delta T, c + \Delta T)}{T(-\infty, +\infty)} \times 100\%,$$

где  $T(a, b)$  – время работы, в течение которого температура находилась в интервале  $(a, b)$ ,  $c$  – среднее значение температуры,  $\Delta T$  – полуширина интерва-



**Рис. 9.** График средней за сутки загрузки компрессоров, в процентах от максимальной, соответствующей 4 постоянно работающим компрессорам.

ла температуры вокруг среднего. Другими словами,  $X(\Delta T)$  показывает долю времени в процентах от общего, в течение которого температура выходила за интервал  $(c - \Delta T, c + \Delta T)$ , а величина  $100 - X(\Delta T)$  – долю времени в процентах, в течение которого температура входила в интервал  $(c - \Delta T, c + \Delta T)$ .

На графиках, приведенных на рисунке 8, видно, что более 90% времени работы кристаллы РВО в модуле № 2 имели температуру, не выходящую за коридор  $-24.95 \pm 0.12^\circ\text{C}$  в сеансе 2009/2011 года и  $-25.03 \pm 0.07^\circ\text{C}$  в сеансе 2011 года. Аналогичный результат получается для других модулей спектрометра.

Приведенные гистограммы и графики показывают, что система охлаждения и температурной стабилизации детектора хорошо справилась с поставленными задачами и обеспечила требуемый температурный режим работы кристаллов РВО, необходимый для получения заданных физических характеристик спектрометра в сеансах 2009–2011 годов.

### 5. ЗАМЕЧЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Стабилизация температуры осуществляется путем периодического включения и отключения компрессоров, так что в каждый момент времени работает от 0 до 4 компрессоров, при этом 4 работающих компрессора соответствуют 100% мощности, составляющей  $\approx 7.2$  кВт. Анализ загрузки,

т.е. среднего числа работающих компрессоров позволяет оценить среднюю потребляемую системой тепловую мощность. На рисунке 9 приведен график средней за сутки загрузки компрессоров в процентах от максимальной загрузки. На графике можно выделить четыре периода работы системы.

В период с 01.10.2009 по 15.02.2010 шло охлаждение, отладка и настройка системы. Загрузка компрессоров была нестабильной, что связано как с проводимыми настройками СОТС, так и с частым отключением ФЭЕ электроники, при которых тепловая нагрузка резко менялась. В период с 15.02.2010 по 03.11.2010 система была настроена и эксплуатировалась в более стабильном тепловом режиме в сеансе 2010 года, при этом загрузка росла с коэффициентом  $\approx 11\%$  в год. К 03.11.2010 загрузка достигла 95% максимальной, после чего цикл регулирования сорвался, и система работала при 100% загрузке.

Во время технического обслуживания с 03.11.2010 по 13.02.2011 удалось значительно (почти на 25%) повысить производительность холодильной машины, что было достигнуто следующим комплексом мер. Регулированием клапана на воду расход воды в радиаторе водяного охлаждения увеличен с 10 до 70 литров в минуту, за счет чего давление фреона в конденсаторе снижено с 18 до 12 Бар, температура конденсации – с 40 до 25°C. Произведена замена фреона, компрессорного масла и жидкостных фильтров. Выполнена тонкая настройка параметров регули-

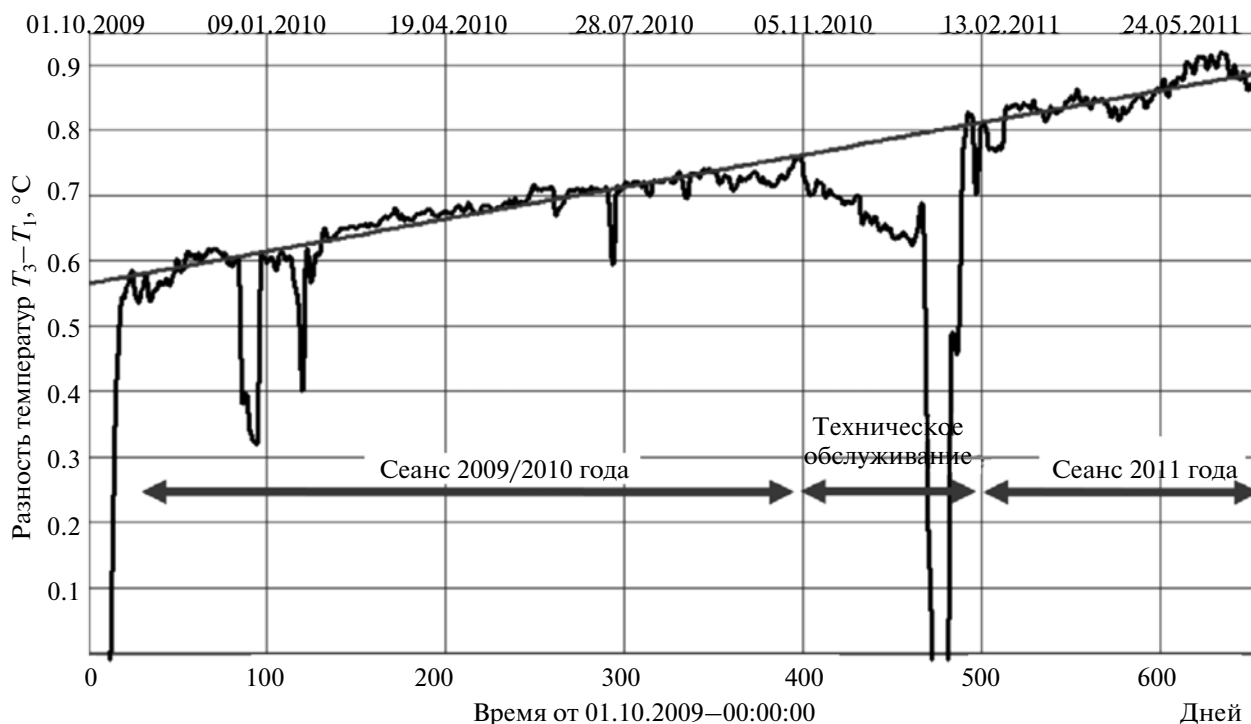


Рис. 10. График разности температур  $T_3 - T_1$  в ресивере на выходе и в узле измерения температуры на входе в охлаждаемый детектор.

рования. После технического обслуживания с 13.02.2011 по 16.07.2011 система работала в сеансе 2011 года в улучшенном режиме, при этом также заметен монотонный рост загрузки с коэффициентом  $\approx 12\%$  в год.

Другой характеристикой для оценки мощности тепловой нагрузки является разность температур  $dT = T_3 - T_1$  между датчиком  $T_3$  в ресивере на выходе и датчиком  $T_1$  в узле измерения температуры на входе в охлаждаемый детектор. Ее можно найти по формуле  $P = dTc\rho f$ , где  $P$  – тепловая мощность нагрузки,  $c$ ,  $\rho$ ,  $f$  – удельная теплоемкость, плотность и поток теплоносителя. При постоянной теплоемкости, плотности и потоке величина  $dT$  пропорциональна мощности  $P$ . На графике (рисунок ) видно, что, исключая периоды технического обслуживания, разница температур линейно растет со скоростью  $\approx 0.18^\circ\text{C}$  в год.

Приведенные графики позволяют предположить, что в ходе эксплуатации системы охлаждения тепловая нагрузка растет на  $\approx 11\%$  в год. Одним из возможных объяснений этого роста является постепенное ухудшение качества теплоизоляции в результате ее намокания из-за конденсации влаги из воздуха. При этом теплоизоляция становится более теплопроводящей, а тепловые потери из-за теплопередачи во внешнюю среду возрастают. Обнаруженный фактор роста тепловой нагрузки необходимо учитывать при техническом обслуживании системы охлаждения, планируя периодическую

замену теплоизоляции или установку мощных компрессоров с большим запасом по холодопроизводительности.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектрометр фотонов PHOS эксплуатируется при температуре кристаллов PWO  $-25^\circ\text{C}$  и требует для получения необходимого энергетического разрешения стабилизации этой температуры с точностью не хуже  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ .

Для обеспечения этих условий была разработана полностью автоматизированная система охлаждения и температурной стабилизации детектора, обеспечивающая высоконадежную длительную бесперебойную эксплуатацию, удаленное наблюдение и управление в условиях отсутствия физического доступа к оборудованию.

В сеансе измерений 2009/2010 года и в сеансе 2011 года температура матрицы кристаллов PWO спектрометра PHOS составила  $-24.95 \pm 0.07^\circ\text{C}$  и  $-25.03 \pm 0.04^\circ\text{C}$  соответственно, что удовлетворяет поставленным техническим требованиям.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The ALICE Collaboration. The ALICE experiment at the CERN LHC // 2008 JINST 3 S08002.
2. Lyndon Evans. The Large Hadron Collider // 2007 New J. Phys. 9 335.

3. *Aleksandrov D.V. et al.* A high resolution electromagnetic calorimeter based on lead-tungstate crystals // Nucl. Instrum. Meth. A550:169-184, 2005.
4. *Ippolitov M. et al.* Lead tungstate crystals for the ALICE/CERN experiment // Nucl. Instrum. Meth. A537:353-356, 2005.
5. *Sibiriyak I. et al.* Preamplifier for ALICE-PHOS project (CERN), calculation and design. ALICE-INT-1999-11 V. 10.
6. *Muller H., Sibiriyak I. et al.* Front-end electronics for PWO-based PHOS calorimeter of ALICE // Nucl. Instrum. Meth. A567:264-267, 2006.
7. *Ippolitov M. et al.* Studies of lead tungstate crystals for the ALICE electromagnetic calorimeter PHOS // Nucl. Instrum. Meth. A486:121-125, 2002.
8. Technical Design Report of the Photon Spectrometer (PHOS) // CERN/LHCC 99-4, ALICE TDR 2, 5 March 1999.
9. *Battistin M.* Technical dossier of the hydraulic installations of the TOF-PHOS-EMCal-CPV detectors cooling system of ALICE experiment // <https://edms.cern.ch/document/781424>
10. *Augustinus A. et al.* The ALICE detector control system, ready for first collisions // Proceedings of ICALEPCS2009, Kobe, Japan.
11. Embedded Local Monitor Board. <http://elmb.web.cern.ch/ELMB/ELMBhome.html>
12. *Курякин А.В., Виноградов Ю.И.* Программа для автоматизации физических измерений и экспериментальных установок (CRW-DAQ) // Свидетельство РФ об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006612848 от 10.08.2006 г., сайт [www.crw-daq.ru](http://www.crw-daq.ru).
13. *Курякин А.В., Виноградов Ю.И.* Программное обеспечение автоматизированных измерительных систем в области тритиевых технологий // ВАНТ. Серия “Термоядерный синтез”. 2008. Выпуск 2. С. 80–90.
14. *Gaspar C., Donzelmann M.* DIM – A Distributed Information Management System for the Delphi experiment at CERN // Proceedings of the 8th Conference on Real-Time Computer applications in Nuclear, Particle and Plasma Physics, Vancouver, Canada, June 1993.
15. <http://lhcb-online.web.cern.ch/lhcb-online/ecs/PVSSIntro.htm>
16. <http://www.etm.at/>
17. The ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.). First proton-proton collisions at the LHC as observed with the ALICE detector: Measurement of the charged particle pseudorapidity density at  $\sqrt{s} = 900$  GeV // Eur. Phys. J. C65:111-125, 2010. 15 pp.
18. The ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.). Charged-particle multiplicity measurement in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 0.9$  and 2.36 TeV with ALICE at LHC // Eur. Phys. J. C68:89-108, 2010. 22 pp.
19. The ALICE Collaboration (K. Aamodt et al.). Charged-particle multiplicity measurement in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV with ALICE at LHC // Eur. Phys. J. C68:345-354, 2010. 11 pp.
20. The ALICE Collaboration (B. Abelev et al.) Charged-particle multiplicity density at mid-rapidity in central Pb–Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV // Phys. Rev. Lett. 105:252-301, 2010. 10 pp.

## Experience of the Long-Term Operation of an Automated Cooling System for the PHOS Electromagnetic Calorimeter in the ALICE Experiment

**A. V. Kuryakin<sup>a</sup>, Yu. I. Vinogradov<sup>a</sup>, N. V. Zav'yalov<sup>a</sup>, V. T. Punin<sup>a</sup>, S. T. Nazarenko<sup>a</sup>, D. V. Budnikov<sup>a</sup>, A. V. Mamonov<sup>a</sup>, S. V. Fil'chagin<sup>a</sup>, A. D. Tumkin<sup>a</sup>, O. P. Vikhlyantsev<sup>a</sup>, A. N. V'yushin<sup>a</sup>, S. A. Sadovskii<sup>b</sup>, Yu. V. Kharlov<sup>b</sup>, and M. Yu. Bogolyubskii<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Russian Federal Nuclear Center VNIIEF, pr. Mira 37, Sarov, Nizhni Novgorod oblast, 607188 Russia

<sup>b</sup> Russian Research Center Institute for High Energy Physics, Protvino, Moscow oblast, 142281 Russia

Received April 4, 2012

The cooling system for the PHOS electromagnetic calorimeter in the ALICE experiment at the LHC in CERN is described. In order to reach an energy resolution of  $\Delta E/E \approx 1\%$ , the PHOS calorimeter operates at a temperature of  $-25^\circ\text{C}$  stabilized with an accuracy of  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . In order to satisfy the indicated stringent requirement, an accurate efficient automated cooling system has been developed to remove the heat emitted by the electronic system of the detector, to monitor the temperature distribution in crystals, and correspondingly to adjust the heat flow to guarantee the temperature stability. This system placed in the experimental shaft is unavailable during the experiment. For this reason, it should satisfy very stringent reliability requirements. Moreover, this system should operate, be monitored remotely, and be integrated in the general control system of the ALICE experiment. The almost continuous operation of the PHOS calorimeter for more than 18 months demonstrates that all requirements of the experiment were satisfied, which makes it possible to reach the required characteristics in the measurement of  $p$ – $p$  and Pb–Pb collisions.

**Keywords:** ALICE experiment, LHC, PHOS calorimeter.