

Система термостабилизации многоэлементного сцинтилляционного экрана

© А.В. Анисенков,¹ С.В. Карпов,¹ А.Н. Козырев,^{1,2,3} А.А. Рубан,¹ Г.В. Ставриецкий,⁴
Д.Н. Шепелев,⁴ О.А. Никитин⁴

¹ Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный технический университет,
630073 Новосибирск, Россия

⁴ Российский Федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
им. акад. Е.И. Забабахина,
456770 Снежинск, Россия
e-mail: S.V.Karpov@inp.nsk.su

Поступило в Редакцию 18 июня 2024 г.

В окончательной редакции 25 сентября 2024 г.

Принято к публикации 27 сентября 2024 г.

Разработана и испытана система термостабилизации многоэлементного сцинтилляционного экрана для регистрации потоков жестких гамма-квантов, состоящего из кристаллов ортогерманата висмута ВГО. Термостабилизация необходима для улучшения энергетического разрешения экрана, поскольку световой выход кристаллов зависит от температуры. Измерены основные характеристики системы, такие как время охлаждения экрана до требуемой рабочей температуры, долговременная стабильность и однородность распределения температуры по полю экрана. Исследовано влияние изменений условий окружающей среды и отказа отдельных элементов системы термостабилизации на стабильность и однородность температуры экрана. Показано, что система термостабилизации обеспечивает высокую долговременную стабильность и однородность температуры с точностью $\pm 0.05^\circ\text{C}$, что позволило получить энергетическое разрешение экрана на уровне 0.5%.

Ключевые слова: детектор, сцинтилляционный, ортогерманат висмута, ВГО, термостабилизация.

DOI: 10.61011/JTF.2024.11.59112.207-24

Введение

В ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера совместно с РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина был создан детектор на базе многоэлементного сцинтилляционного экрана (МСЭ) [1,2] для регистрации потоков жестких гамма-квантов. Данное устройство может быть использовано для импульсной рентгенографии объектов с высокими атомными номерами и большими оптическими толщинами, в том числе при их деформировании в ходе быстропротекающих процессов.

Регистрация жестких гамма-квантов в МСЭ осуществляется с помощью сцинтилляционных кристаллов. Наиболее подходящими для подобного детектора по плотности, времени затухания и световому выходу сцинтилляторами являются ортосиликат лютеция-иттрия LYSO, ортосиликат лютеция LSO и ортогерманат висмута ВГО. Данные сцинтилляторы широко используются в калориметрах [3–9] и в позитронно-эмиссионных томографах [10–13]. В России в настоящее время производятся в массовом количестве только кристаллы ВГО. В МСЭ для регистрации гамма-квантов используются кристаллы ВГО, произведенные в Институте неорганической

химии им. А.В. Николаева [14]. Достоинствами данного вида кристаллов являются их высокий атомный номер, относительно высокий световой выход, хорошая химическая и механическая стабильность. К недостаткам можно отнести сильную зависимость световых выходов от температуры. Световой выход понижается на 1.55% при повышении температуры на 1°C . В связи с этим для получения высокого энергетического разрешения необходимо обеспечение температурной стабилизации детектора. Ранее подобная задача была успешно решена при разработке калориметра на основе кристаллов ВГО, входящего в состав детектора элементарных частиц КМД-3, используемого в ИЯФ СО РАН на ускорительном комплексе ВЭПП-2000. Для термостабилизации кристаллов применено водяное охлаждение медной кольцевой опоры калориметра, в которой размещены модули, состоящие из кристаллов с фотоприемниками и зарядочувствительными усилителями. В этом калориметре получена стабильность температуры кристаллов $\pm 1^\circ\text{C}$ при рабочей температуре $10 - 12^\circ\text{C}$. Получено энергетическое разрешение калориметра на уровне 3–7% [15,16].

Для обеспечения высокого качества рентгенографических изображений, получаемых с помощью МСЭ,

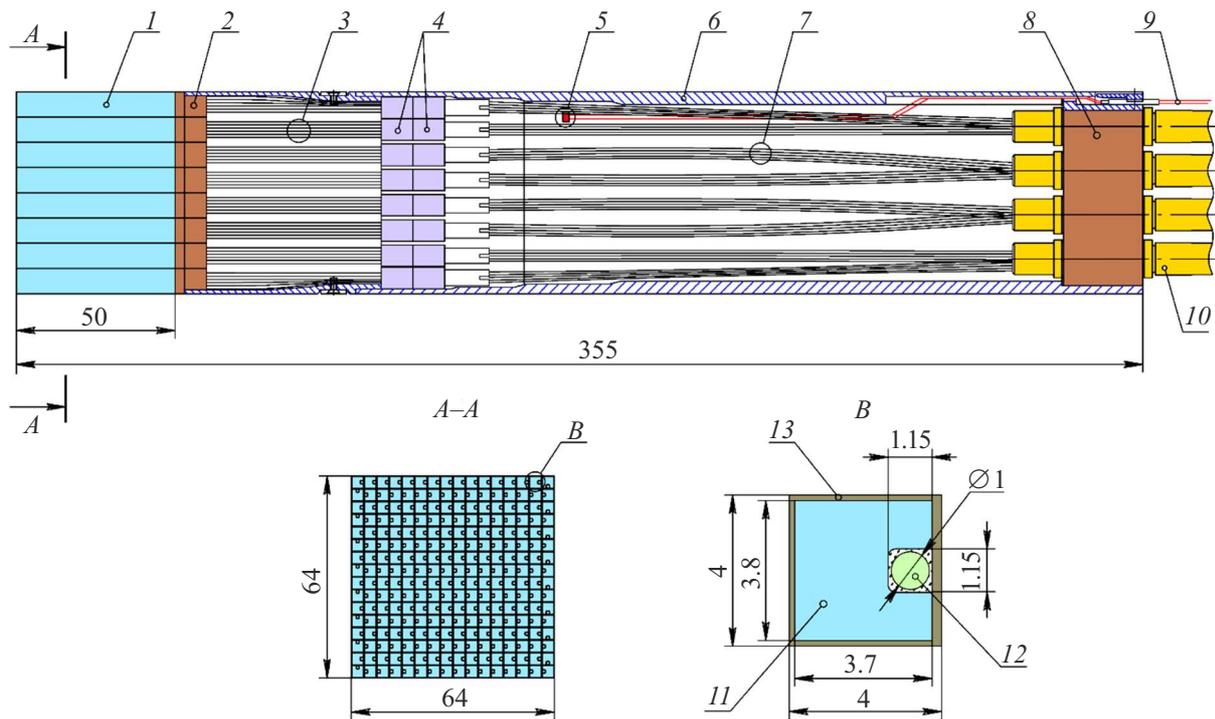


Рис. 1. Конструкция модуля МСЭ. Пояснение в тексте.

стабильность преобразования выделенной в кристаллах энергии в измеряемый сигнал должна быть лучше 1%. Для этого однородность и стабильность распределения температуры между кристаллами должны находиться в пределах $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

Целью работы, которой посвящена данная статья, являлось создание системы термостабилизации МСЭ, которая обеспечивала бы долговременную однородность и стабильность распределения температуры кристаллов не хуже $\pm 0.5^\circ\text{C}$ в условиях, когда системой кондиционирования в помещении, где располагается МСЭ, обеспечивается поддержание температуры в диапазоне $18\text{--}25^\circ\text{C}$.

Данная система разработана и прошла испытания. По условиям эксперимента для термостабилизации не может быть использовано жидкостное охлаждение, как в ВГО-калориметре детектора КМД-3. В связи с этим для термостабилизации МСЭ разработано принципиально новое решение. МСЭ помещен в теплоизолированный металлический корпус. Фотоприемники и электроника вынесены за пределы корпуса; таким образом, выделение тепла внутри корпуса отсутствует, а приток тепла к МСЭ обусловлен только разницей между его температурой и температурой окружающей среды. Для охлаждения и стабилизации температуры МСЭ используются термоэлектрические сборки на основе элементов Пельтье, расположенные на боковых стенках корпуса.

По результатам испытаний системы установлено, что она обеспечивает долговременную стабильность и однородность температуры выше предъявляемых техниче-

ских требований, что позволило получить предельное энергетическое разрешение многоэлементного сцинтилляционного экрана на уровне 0.5%, являющееся рекордным для кристаллических детекторов подобного типа.

В настоящей работе описан принцип действия системы термостабилизации, дано описание ее составляющих частей, а также приведены результаты испытаний.

1. Многоэлементный сцинтилляционный экран

Многоэлементный сцинтилляционный экран представляет собой матрицу 8×8 модулей, фронтальные размеры экрана равны $512 \times 512\text{ mm}$, длина — 355 mm , из которых 50 mm — длина кристаллов. Общая масса кристаллов ВГО составляет 74.4 kg , масса корпусов модулей — 70 kg .

На рис. 1 показана конструкция отдельного модуля.

Регистрирующая часть 1 модуля представляет собой матрицу — из 128 регистрирующих элементов В на основе кристаллов ВГО. Каждый кристалл 11 обернут светоотражающим и светоизолирующим слоем 13, состоящим из тефлоновой ленты толщиной $80\text{ }\mu\text{m}$ и алюминиевой фольги толщиной $20\text{ }\mu\text{m}$. В каждом кристалле по всей длине прорезана канавка. В канавку вклеено оптическое клей сцинтилляционное спектросмещающее волокно 12, в котором происходит переизлучение света, собранного с кристалла, для дальнейшей передачи к фотоприемнику. Для улучшения светоизоляции на грани, на которой прорезана канавка, тефлон уложен внахлест.

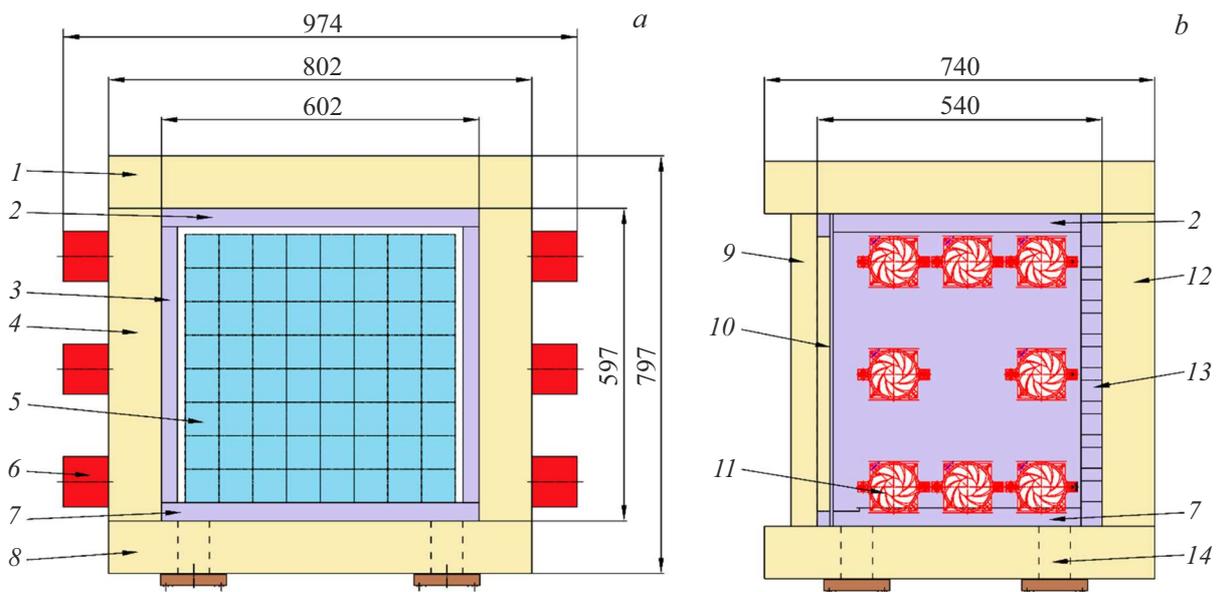


Рис. 2. Теплоизолированный охлаждаемый корпус: *a* — вид спереди без передней теплоизоляции и переднего экрана; *b* — вид сбоку без боковой теплоизоляции. 1 — верхняя теплоизоляция; 2 — верхняя крышка корпуса; 3 — боковая стенка корпуса; 4 — боковая теплоизоляция; 5 — фронтальная поверхность МСЭ; 6 — воздуховод термоэлектрической сборки; 7 — нижняя плита корпуса; 8 — нижняя теплоизоляция; 9 — передняя теплоизоляция; 10 — передний экран корпуса; 11 — термоэлектрическая сборка; 12 — задняя теплоизоляция; 13 — задняя стенка корпуса; 14 — опора.

Таким образом, на ней получается два слоя материала, что обеспечивает отсутствие зазоров в покрытии и дополнительно увеличивает прочность крепления волокон. Матрица из регистрирующих элементов снаружи плотно упакована в алюминизированную лавсановую пленку толщиной $20\ \mu\text{m}$. Спектрсмещающие волокна 3, выходящие из кристаллов, проходят через зажимы 2. Концы волокон закреплены в 16-канальных оптических разъемах 4. С задней стороны к модулю подключены оптические кабели 10 от фотоприемников. Оптические волокна 7 из кабелей проходят через зажимы 8 и соединяются со спектрсмещающими волокнами через оптические разъемы 4. Зажимы, спектрсмещающие волокна, оптические разъемы и оптические волокна заключены в прямоугольный корпус 6, изготовленный из дюралюминия Д16Т. На одну из внутренних стенок корпуса приклеен датчик температуры 5, витые пары 9 от которого выведены наружу позади корпуса.

2. Принцип действия и состав системы термостабилизации

Для обеспечения термостабилизации температура МСЭ понижается ниже температуры в помещении и поддерживается на заданном уровне. При этом понижение температуры осуществляется в активном режиме охлаждающими элементами, а повышение — в пассивном режиме за счет теплообмена с окружающей средой.

В состав системы термостабилизации входят:

- теплоизолированный корпус с охлаждающими элементами;
- датчики температуры и относительной влажности воздуха;
- электроника системы термостабилизации;
- программный комплекс системы термостабилизации.

МСЭ устанавливается внутрь теплоизолированного корпуса (рис. 2), который представляет собой прямоугольный толстостенный металлический короб, покрытый со всех сторон теплоизоляционным слоем для уменьшения теплообмена с окружающей средой. Охлаждение корпуса осуществляется посредством термоэлектрических сборок на основе элементов Пельтье (рис. 3), закрепленных на боковых металлических стенках корпуса. Для понижения температуры на термоэлектрические сборки подается питание, для повышения температуры питание отключается. Боковые стенки корпуса охлаждаются независимо друг от друга группой термоэлектрических сборок, установленных на соответствующей стенке. Основной теплообмен между корпусом и МСЭ происходит за счет контакта нижней поверхности МСЭ с нижней плитой корпуса, поэтому для обратной связи используются показания температурных датчиков, установленных в крайних модулях МСЭ нижнего ряда.

Для измерения температуры используются 64 датчика температуры, установленных внутри корпусов модулей МСЭ, 16 датчиков на боковых металлических стенках теплоизолированного корпуса, установленных рядом с термоэлектрическими сборками, 1 датчик температуры в помещении. Для измерения относительной влажности

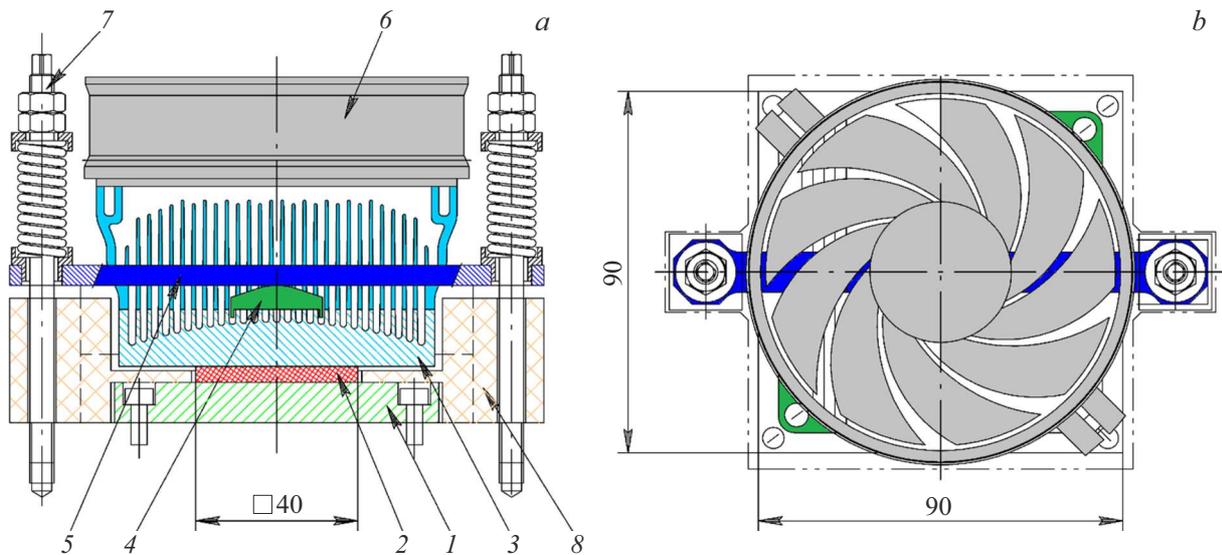


Рис. 3. Термоэлектрическая сборка: *a* — вид сбоку, *b* — вид сверху. 1 — медная пластина; 2 — элемент Пельтье; 3 — радиатор; 4 — опора пружины; 5 — пружина; 6 — вентилятор; 7 — подпружиненная шпилька; 8 — теплоизоляция.

воздуха используются 4 датчика влажности, расположенные внутри теплоизолированного корпуса, и 2 датчика влажности в помещении.

3. Теплоизолированный охлаждаемый корпус

Верхняя крышка, нижняя плита, боковые и задняя стенки металлического корпуса изготовлены из алюминиевого сплава В95, который обладает низкой склонностью к деформациям после обработки. Толщина нижней плиты 35 мм, боковых стенок — 30 мм, задней стенки — 40 мм, верхней крышки — 35 мм. Масса корпуса составляет 150 кг. Передний экран корпуса, находящийся между источником гамма-квантов и фронтальной поверхностью МСЭ, изготовлен из алюминия марки А5М с высоким коэффициентом теплопроводности и имеет толщину 1 мм для минимизации поглощения энергии регистрируемых гамма-квантов. Выбор толщины переднего экрана был сделан на основании испытаний системы термостабилизации с макетом МСЭ. Было показано, что при отсутствии переднего экрана распределение температур на фронтальной поверхности макета не укладывается в технические требования, а использование экрана толщиной 1 мм обеспечивает однородность температуры с амплитудой $\pm 0.1^\circ\text{C}$, использование экрана большей толщины нецелесообразно, так как не приводит к улучшению однородности.

Нижняя плита корпуса имеет четыре опоры, изготовленные из стеклотекстолита СТЭФ-1 для уменьшения теплообмена с опорной поверхностью, на которой установлен корпус.

Для теплоизоляции металлического корпуса от окружающей среды использован экструдированный пе-

нополистирол с коэффициентом теплопроводности $0.033 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ и плотностью $30 \text{ kg}/\text{m}^3$. Толщина верхней, боковой, нижней и задней теплоизоляции — 100 мм. Толщина передней теплоизоляции уменьшена до 50 мм для снижения поглощения энергии гамма-квантов.

На каждой из боковых стенок металлического корпуса установлено по 8 термоэлектрических сборок. Термоэлектрическая сборка состоит из медной пластины, которая крепится к стенке корпуса винтами, элемента Пельтье, радиатора и вентилятора. Радиатор и элемент Пельтье через специальную опору прижаты к медной пластине посредством плоской пластинчатой пружины, концы которой зафиксированы шпильками, подпружиненными для регулировки прижимного усилия.

4. Электроника системы термостабилизации

На рис. 4 показана блок-схема управления системой термостабилизации.

Электроника системы термостабилизации разделена на три группы: измерительная, исполнительная и управляющая. Измерительная электроника предназначена для взаимодействия с датчиками температуры и влажности, исполнительная — для управления режимом работы термоэлектрических сборок, управляющая — для организации обмена данными. Каждая из групп реализована в виде независимых электронных блоков, выполненных на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Это позволило увеличить ремонтопригодность электроники, повысить ресурс модернизации, сократить время диагностики и восстановления системы путем замены блоков.

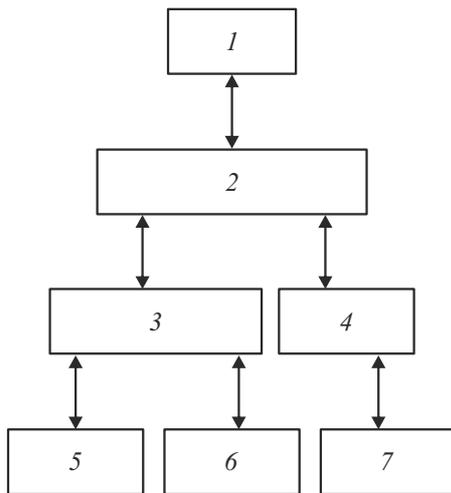


Рис. 4. Блок-схема управления системой термостабилизации: 1 — сервер, 2 — управляющая электроника, 3 — измерительная электроника, 4 — исполнительная электроника, 5 — датчики температуры, 6 — датчики влажности, 7 — термоэлектрические сборки.

Управление работой электроники производится сервером, на котором работает программный комплекс системы термостабилизации. Между сервером и блоком управляющей электроники происходит обмен информационными пакетами по сети Ethernet.

Блок управляющей электроники включает в себя одноплатный микрокомпьютер и блок приема-передачи данных. В соответствии с командами, получаемыми от сервера, управляющий блок взаимодействует с блоками измерительной и исполнительной электроники по разработанному в ИЯФ СО РАН интерфейсу C-Link, описанному в [17], посредством коммуникационного программного обеспечения. Блокам измерительной электроники он задает требуемые уровни возбуждения датчиков температуры и влажности, а также принимает из них данные о напряжении с датчиков. Из блоков исполнительной электроники выдаются данные о питании термоэлектрических сборок, а также в них загружаются величины требуемых уровней питания элементов Пельтье и вентиляторов, определяемые показаниями датчиков температуры, используемых для обратной связи.

Исполнительная электроника включает в себя восемь блоков. Каждый блок имеет два канала для управления двумя термоэлектрическими сборками. В каждом канале содержатся усилители мощности для питания элементов Пельтье и регулирования скорости вращения вентиляторов.

Функциональная схема блока измерительной электроники показана на рис. 5.

Измерительная электроника включает в себя одиннадцать блоков измерения температуры и один блок измерения влажности. Каждый блок содержит восемь каналов измерения. Основные узлы цифровой обработки

сигналов и интерфейсов блоков измерения влажности и температуры унифицированы в аппаратной логике ПЛИС. Существенное отличие блоков состоит в структуре входного каскада и генератора возбуждения датчика.

В качестве датчиков температуры используются термопреобразователи сопротивления Heraeus M222, тип Pt100: класс точности 1/3 V (0.1 °C); сопротивление 100 Ω при температуре 0 °C; температурный коэффициент сопротивления 0.385 Ω/°C; ток питания 1 mA. Для измерения влажности использованы датчики НН-4000-003: напряжение питания 4.5 V, выходной сигнал 0.8–3.8 V, класс точности 3.5%.

Разность потенциалов, создаваемая датчиками, подается на вход модуля „заградительный фильтр“. Данный модуль служит для подавления помех с частотой колебаний выше 1 kHz. Затем разность потенциалов с датчика оцифровывается с помощью 18-разрядного АЦП последовательного приближения. Некоторая избыточность в разрядности АЦП позволяет не использовать масштабирующий-сдвигающий предусилитель и соответственно избавиться от проблемы дрейфа его параметров, связанного с температурой, питанием и временем, что повышает надежность и снижает стоимость. АЦП работает в режиме избыточных выборок, что позволяет автоматически производить оценку качества сигнала с датчика, а также подавлять внешние наводки на кабельной линии передачи аналоговых сигналов датчиков. Данные с АЦП обрабатываются схемами, реализованными в модуле „Аппаратная логика“.

На рис. 6 показаны схемы подключения датчиков.

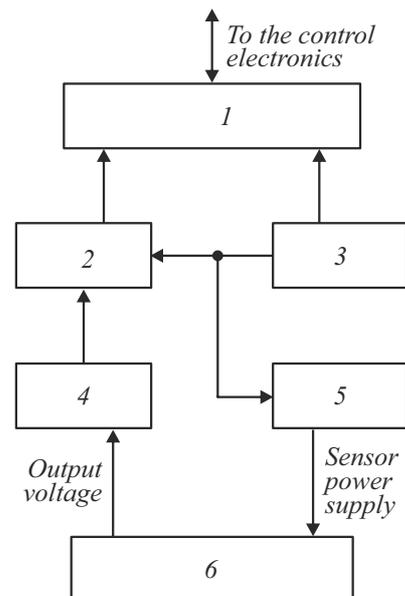


Рис. 5. Функциональная схема блока измерительной электроники: 1 — аппаратная логика, 2 — АЦП, 3 — источник опорного напряжения, 4 — заградительный фильтр, 5 — генератор возбуждения, 6 — датчик температуры или влажности.

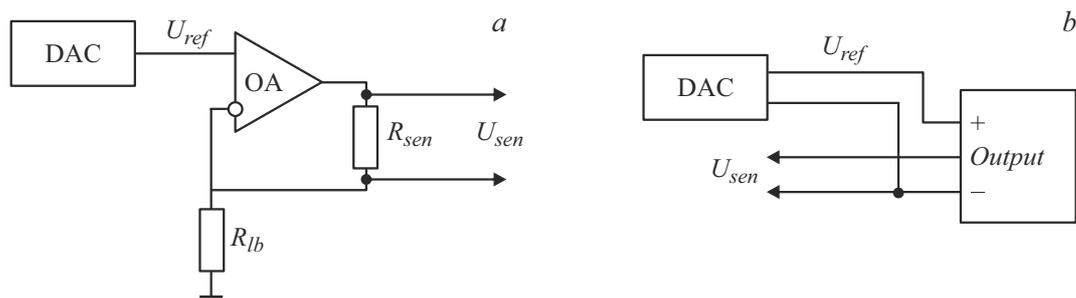


Рис. 6. Схемы подключения датчиков: *a* — датчик температуры; *b* — датчик влажности. DAC — цифро-аналоговый преобразователь, 12 бит; U_{ref} — опорное напряжение, задаваемое DAC; OA — операционный усилитель; R_{lb} — прецизионный токозадающий резистор обратной связи C2-29; R_{sen} — сопротивление датчика температуры; U_{sen} — выходное измеряемое напряжение на датчике.

Источники опорного напряжения для питания датчиков U_{ref} выполнены на основе цифро-аналоговых преобразователей. Генератор возбуждения датчика температуры выполнен на основе прецизионного операционного усилителя (ОУ) и представляет собой стабильный повторитель опорного напряжения. Выходная линия генератора защищена от электростатических разрядов с помощью резисторно-диодной цепи. Тип ОУ выбран так, чтобы он был способен длительно выдерживать короткое замыкание выхода на землю, не вызывая отказа платы. Благодаря отрицательной обратной связи на инвертирующем входе поддерживается напряжение U_{ref} , под действием которого через датчик протекает ток $I = U_{ref}/R_{lb}$, а выходной сигнал с датчика равен $U_{sen} = I \cdot R_{sen}$.

В связи с тем что каждый датчик температуры имеет свой собственный источник питания, возможны небольшие различия токов питания датчиков, связанные с различием сопротивлений токозадающих резисторов R_{lb} . Для повышения точности измерения проводится индивидуальная калибровка каждого канала измерения температуры. Для этого используется 8 образцовых резисторов с сопротивлением, близким к 100Ω . Непосредственно перед калибровкой проводится измерение сопротивления каждого резистора прецизионным мультиметром по четырехпроводной схеме подключения с точностью 0.005Ω . После этого образцовые резисторы подключаются к восьми каналам блока измерения температуры, и производится многократное снятие показаний, результаты которых усредняются. По результатам измерений рассчитываются коэффициенты пересчета измеренного напряжения в сопротивление нагрузки так, чтобы это сопротивление для каждого канала точно соответствовало сопротивлению резистора, подключенного к нему. Эти коэффициенты заносятся в базу данных калибровок блоков и используются в дальнейшем для пересчета измеряемого напряжения в температуру датчика. Использование подобной методики позволяет избежать необходимости постоянного измерения тока в каждом датчике. Точность измерения температуры в итоге определяется ценой младшего бита измеряющего

АЦП, которая составляет $22 \mu V$. Поскольку температурный коэффициент датчиков составляет $0.385 \Omega/^\circ C$, при токе питания 1 mA точность измерения температуры, связанная с разрядностью АЦП, ограничивается величиной $0.057^\circ C$, а увеличение точности достигается усреднением результатов нескольких последовательных измерений. Данная точность является достаточной для измерения неоднородности температуры модулей в допустимых пределах $\pm 0.5^\circ C$.

Подключение датчиков температуры и влажности производится через разъемы USB кабелями из двух витых пар, но схемы подключения различаются. Датчики температуры подключены по четырехпроводной схеме (рис. 6, *a*): измерительный ток течет через одну пару проводов, а напряжение измеряется на другой паре, через которую ток практически не течет. Таким образом, паразитное сопротивление проводов и контактов не влияет на результаты измерений. Датчики влажности подключены по трехпроводной схеме: одна витая пара несет напряжение возбуждения датчика U_{ref} , другая пара — выходной сигнал датчика U_{sen} , но на терминале датчика с условной „землей“ витые пары имеют общий контакт (рис. 6, *b*).

5. Программный комплекс системы термостабилизации

Структурно программное обеспечение делится на две части:

- 1) работающее в микрокомпьютере блока управляющей электроники;
- 2) работающее на управляющем сервере системы термостабилизации.

Блок управляющей электроники включает в себя одноплатный микрокомпьютер с установленной операционной системой архитектуры Linux и блок приема-передачи данных. В микрокомпьютере работает сервисная программа, реализованная как сервер с обменом по протоколу TCP/IP, принимающая команды от пользовательских программ управляющего сервера и

отправляющая их в блок приема-передачи данных через интерфейс C-Link для дальнейшего обмена данными непосредственно с блоками исполнительной и измерительной электроники.

На управляющем сервере работают следующие программы:

- веб-сервер, обеспечивающий работу веб-интерфейса, посредством которого оператор управляет системой термостабилизации;
- программа сбора данных с блоков исполнительной и измерительной электроники;
- программа отправки данных в базу данных PostgreSQL;
- программа стабилизация температуры.

Для контроля системы термостабилизации используется веб-интерфейс. В качестве основы веб-интерфейса использован программный пакет MIDAS [18], первоначально созданный как система сбора данных для небольших и средних экспериментальных физических установок. Данный программный пакет с добавочными надстройками успешно применяется для Online-контроля и управления системой сбора данных на детекторе элементарных частиц КМД-3 в ИЯФ СО РАН [19], что явилось определяющим фактором при выборе программного обеспечения для системы термостабилизации. Веб-интерфейс позволяет оператору запускать и останавливать перечисленные выше пользовательские программы, кроме веб-сервера, который работает непрерывно.

Программа сбора данных с блоков исполнительной и измерительной электроники каждые 60 с получает из блоков значения напряжений на датчиках, напряжений питания элементов Пельтье и вентиляторов, а также напряжений, соответствующих токам питания элементов Пельтье и вентиляторов. Последние 100 значений, измеренных в каждом канале, сохраняются в файлах и отображаются в Online базе данных (ОБД). Также сохраняются значения температуры, относительной влажности и токов питания, которые получают из измеренных напряжений в соответствии с хранящимися в базе данных калибровками.

Программа отправки данных каждые 15 min копирует данные из файлов в базу данных PostgreSQL для длительного хранения.

Программа стабилизации температуры независимо от программы сбора данных проводит измерения температуры и устанавливает необходимые уровни питания элементов Пельтье и вентиляторов в зависимости от показаний датчиков температуры, используемых для обратной связи.

Текущий контроль измеряемых величин осуществляется оператором по таблицам (последние измеренные значения) и по графикам, на которых отображаются результаты последних 100 измерений из ОБД в режиме реального времени. Информация о работе системы термостабилизации в прошлом может быть получена в виде графиков из базы данных PostgreSQL за любой промежуток прошедшего времени, заданный оператором.

В связи с тем что МСЭ и теплоизолированный корпус обладают значительной массой и теплоемкостью, их охлаждение и стабилизация температуры занимают продолжительное время. При разработке предусмотрен сценарий, в котором программа термостабилизации может быть запущена автоматически по расписанию, заранее составленному оператором, без использования веб-интерфейса.

Несанкционированное прекращение работы программ или сбои в работе электроники могут приводить к прекращению обмена данными и нарушению процесса термостабилизации, поэтому оператору необходимы средства своевременного оповещения о любых нарушениях в системе. В пакете MIDAS реализована встроенная система оповещений разного уровня (простое предупреждение, сигнал тревоги), позволяющая оператору получать сообщения о прекращении работы программ или выходе за допустимые пределы контролируемых параметров, который может свидетельствовать о нарушениях в работе системы. Помимо внутренних средств контроля MIDAS для обеспечения устойчивости и надежности работы программного обеспечения используется набор скриптов, позволяющий обнаруживать несанкционированное прекращение работы программ и автоматически восстанавливать те из них, которые должны быть запущены в данный момент.

6. Испытания системы термостабилизации

В ходе пусконаладочных работ были проведены испытания системы термостабилизации, в результате которых определены:

- время, которое требуется для охлаждения МСЭ от начальной температуры до заданного уровня температуры стабилизации и перехода МСЭ в квазистационарный температурный режим;
- долговременная стабильность и однородность температуры по всем модулям МСЭ в режиме стабилизации;
- степень устойчивости режима термостабилизации в случаях нештатных ситуаций, таких, как отключение части или всех термоэлектрических сборок, а также быстрое кратковременное изменение температуры воздуха в помещении, где расположен МСЭ.

На рис. 7 показан характерный график охлаждения модулей МСЭ. В основном охлаждение модулей происходит за счет теплопроводности через нижнюю плиту корпуса и незначительно за счет контакта с боковыми стенками корпуса через элементы его конструкции. В результате после начала охлаждения изменение температуры модулей происходит снизу вверх: первым охлаждается нижний ряд модулей, затем остальные. Во время охлаждения от начального состояния разница температуры между нижними и верхними модулями может достигать 3 °С.

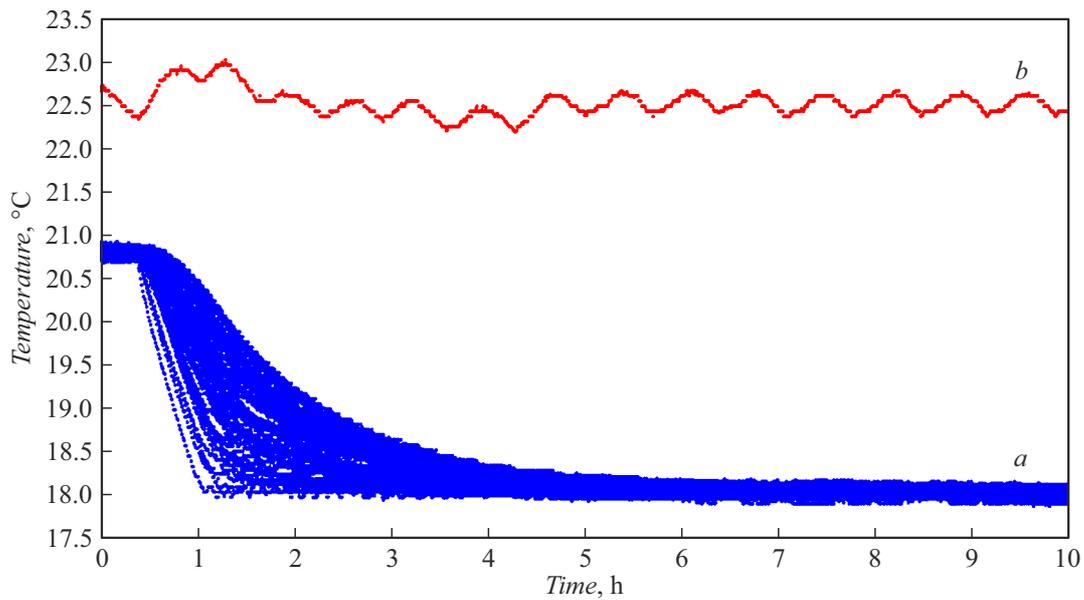


Рис. 7. Температура модулей МСЭ (а) и в окружающем помещении (b) во время охлаждения и стабилизации температуры.

Контроль температуры осуществляется по показаниям термодатчиков в двух крайних модулях нижнего ряда. Пока температура нижних модулей выше требуемой температуры стабилизации, охлаждение идет непрерывно с мощностью близкой к 12 W на один элемент Пельтье.

После того, как температура нижних модулей достигает необходимого уровня, начинается процесс стабилизации: амплитуда тока питания элементов Пельтье снижается в соответствии с конфигурацией программы термостабилизации, а сами элементы включаются и выключаются таким образом, чтобы температура этих модулей оставалась постоянной. После начала процесса стабилизации интегральная мощность охлаждения постепенно снижается, разность температур между нижними и верхними модулями уменьшается. Через некоторое время МСЭ переходит в квазистационарное состояние: распределение температур по полю МСЭ находится в коридоре фиксированной ширины в течение длительного времени.

Датчики температуры во время эксплуатации МСЭ не могут размещаться непосредственно на поверхности кристаллов, поэтому они расположены на внутренней поверхности корпусов модулей. Каждый кристалл обернут тефлоновой лентой, что снижает поперечную теплопроводность кристаллической матрицы и приводит к задержке охлаждения кристаллов по сравнению с корпусами модулей. Для измерения времени задержки во время испытаний на фронтальную поверхность матрицы из кристаллов были установлены 16 дополнительных датчиков температуры. Указанное время запаздывания температуры кристаллов составило 1 h. Результаты измерений времени охлаждения, стабильности и однород-

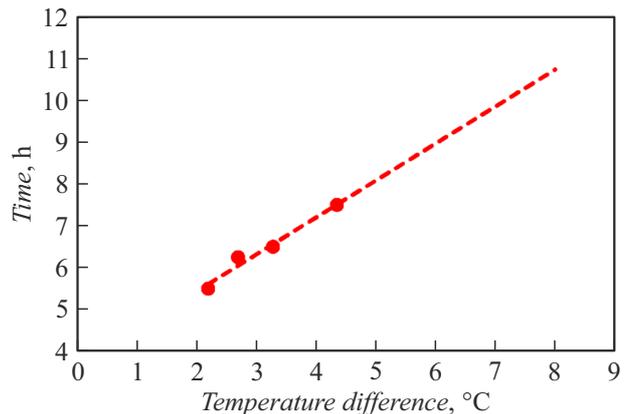


Рис. 8. Зависимость времени выхода температуры модулей МСЭ на квазистационарный режим от разности начальной и конечной температур.

ности температуры МСЭ приведены с учетом показаний датчиков, установленных на фронтальной поверхности.

На рис. 8 приведены результаты измерения промежутка времени от начала охлаждения МСЭ до выхода температуры на квазистационарный режим. Измерения проводились при различных начальных (19.2–20.8 °C) и конечных (15–17 °C) температурах МСЭ, поэтому результат представлен в виде зависимости времени от разности начальной и конечной температур. Штриховой линией показано линейное приближение зависимости времени от разности температур. Ожидается, что при наибольшей начальной температуре 25 °C и температуре стабилизации 17 °C время выхода на квазистационарный режим может составить 10.7 h.

На рис. 9 приведен график температуры модулей в квазистационарном режиме. В долговременном квазистационарном режиме при заданной температуре крайних модулей нижнего ряда 17°C средняя температура модулей составляет $T_{med} = 17.05^\circ\text{C}$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_T = 0.05^\circ\text{C}$, что в десять раз превосходит точность однородности и стабильности в 0.5°C , заданную в технических требованиях к системе термостабилизации. Наиболее продолжительный промежуток работы системы в режиме непрерывной стабилизации во время испытаний составил один месяц.

Были проведены испытания на устойчивость системы термостабилизации к влиянию нештатных ситуаций. Исследование устойчивости к неисправностям охладителей проводилось в условиях, когда МСЭ находился в квазистационарном режиме при температуре 17°C , температура в помещении $21.8\text{--}22.8^\circ\text{C}$. Неисправность охладителей была имитирована путем отключения половины термоэлектрических сборок на протяжении 2 h. В течение этого периода минимальная температура модулей оставалась на постоянном уровне $16.96\text{--}16.98^\circ\text{C}$, а максимальная равномерно увеличивалась с 17.23 до 17.3°C .

Испытание на устойчивость к изменению температуры окружающей среды проводилось в условиях, когда МСЭ находился в квазистационарном режиме при температуре 15°C . Температура в помещении составляла 22.4°C . В течение 2 h температура в помещении понижалась до 16.5°C . При этом наблюдалось понижение минимальной температуры модулей на 0.1°C без дальнейших изменений до конца понижения температуры. Таким образом, режим стабилизации является устойчивым к быстрым изменениям температуры окружающей среды.

Температура в помещении во время отогрева МСЭ составляла $22\text{--}23^\circ\text{C}$, начальная температура МСЭ —

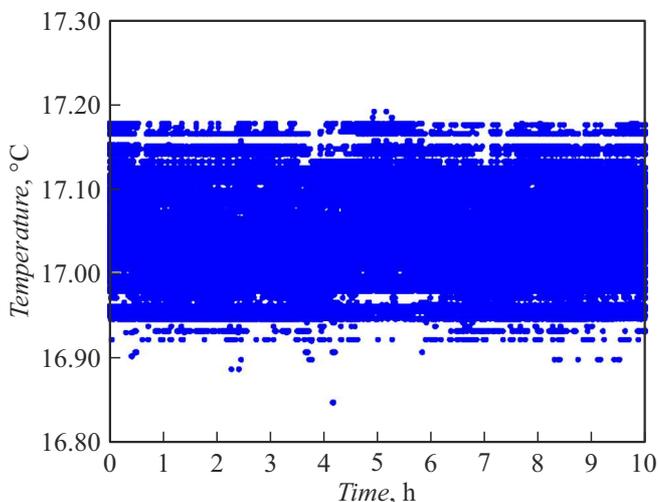


Рис. 9. Температура МСЭ в квазистационарном режиме термостабилизации.

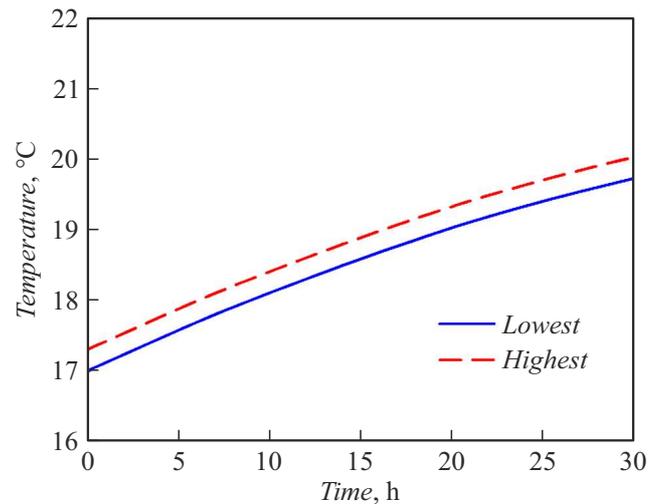


Рис. 10. Минимальная и максимальная температура модулей МСЭ при полном отключении стабилизации.

$17\text{--}17.3^\circ\text{C}$. Из рис. 10 видно, что даже при полном отсутствии термостабилизации температура модулей может оставаться в диапазоне $17\text{--}18^\circ\text{C}$ по абсолютным значениям в течение нескольких часов после начала отогрева, т.е. в течение этого времени однородность распределения температуры по кристаллам продолжает удовлетворять техническим требованиям. Таким образом, вследствие значительной инерционности МСЭ, даже сравнительно длительные перебои в работе системы термостабилизации не могут повлиять на качество эксперимента.

Заключение

Разработана, изготовлена и испытана система термостабилизации МСЭ, предназначенного для регистрации потоков жестких гамма-квантов. Система термостабилизации обеспечивает долговременную однородность и стабильность температуры кристаллов ортогерманата висмута, из которых изготовлен экран, при этом достигнутая точность поддержания температуры на порядок превышает исходные технические требования и составляет $\pm 0.05^\circ\text{C}$. Система является устойчивой к воздействию различных факторов, таких, как выход из строя части охлаждающих элементов Пельтье или быстрое изменение температуры окружающей среды. Требуемая однородность распределения температуры $\pm 0.5^\circ\text{C}$ может сохраняться в течение нескольких часов после прекращения термостабилизации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.С. Афанасенко, Р.Р. Ахметшин, Д.Н. Григорьев, В.Ф. Казанин, В.В. Порошев, А.В. Тимофеев, Р.И. Щербаков. *Автометрия*, **57** (2), 82 (2021).
- [2] А.В. Тимофеев. *Многоэлементный сцинтилляционный экран для регистрации потоков жестких гамма-квантов* (Дисс. 2023).
URL: <https://www.inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-01#faqnoanchor>
- [3] C. Cecchi, V. Bocci, S. Germani, P. Lubrano, E. Manoni, A. Rossi, M. Lebeau, M. Bizzarri, G. Chiodi, A. Papi, L. Recchia. *J. Phys.: Conf. Series*, **293**, 012066 (2011).
- [4] Д.Н. Григорьев. *Торцевой калориметр детектора КМД-2 на основе кристаллов ортогерманата висмута* (Дисс. ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1999)
- [5] Р.Р. Ахметшин. *Торцевой электромагнитный калориметр на основе кристаллов BGO для детектора КМД-3* (Дисс. ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 2017),
URL: http://irbiscorp.spsl.nsc.ru/fulltext/DISSER/2017/Akhmetshin_disser.pdf
- [6] F. Kocak. *Acta Phys. Polonica A*, **131** (3), 527 (2017).
- [7] D. Anderson, A. Apresyan, A. Bornheim, J. Duarte, C. Pena, A. Ronzhin, M. Spiropulu, J. Trevor, S. Xie. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **794**, 7 (2015).
- [8] Y. Wei, Yu. Zhang, Zh. Zhang, L. Wu, S. Wen, H. Dai, Ch. Liu, X. Wang, Z. Xu, G. Huang, Ch. Feng, Sh. Liu, Q. An. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **922**, 177 (2019).
- [9] B. Bantes, D. Bayadilov, R. Beck, M. Becker, A. Bella, P. Bielefeldt, J. Bieling, M. Bleckwenn, S. Böse, A. Braghieri, K.-Th. Brinkmann, D. Burdeynyi, F. Curciarello, V. De Leo, R. Di Salvo, H. Dutz, D. Elsner, A. Fantini, O. Freyermuth, S. Friedrich, F. Frommberger, V. Ganenko, D. Geffers, G. Gervino, F. Ghio, G. Giardina, B. Girolami, D. Glazier, S. Goertz, A. Gridnev, E. Gutz, D. Hammann, J. Hannappel, P.-F. Hartmann, W. Hillert, A. Ignatov, R. Jahn, R. Joosten, T.C. Jude, F. Klein, K. Koop, B. Krusche, A. Lapik, P. Levi Sandri, I. Lopatin, G. Mandaglio, P. Mei, F. Messi, R. Messi, V. Metag, D. Moricciani, M. Novova, V. Nedorezov, D. Novinskiy, P. Pedroni, M. Romaniuk, T. Rostomyan, N. Rudnev, C. Schaerf, G. Scheluchin, H. Schmieden, V. Sumachev, V. Tarakanov, V. Vegna, D. Walther, D. Watts, H.-G. Zaunick, T. Zimmermann. *J. Phys.: Conf. Series*, **587**, 012042 (2015).
- [10] S. Aogaki, F. Takeuchi. *IEEE Transactions on Nuclear Sci.*, **57** (3), 1502 (2010).
- [11] C.M. Pepin, Ph. B?rard, A.-L. Perrot, C. P?pin, D. Houde, R. Lecomte, Ch.L. Melcher, H. Dautet. *IEEE Transactions on Nuclear Sci.*, **51** (3), 789 (2004).
- [12] H. Zhang, N.T. Vu, Q. Bao, R.W. Silverman, B.N. Berry-Pusey, A. Douraghy, D.A. Williams, F.R. Rannou, D.B. Stout, A.F. Chatziioannou. *IEEE Transactions on Nuclear Sci.*, **57** (3), 1038 (2010).
- [13] T.G. Turkington, J.J. Williams, J.W. Wilson, J.G. Colsher, D.L. McDaniel, C.L. Kim, S.G. Ross, C.W. Stearns, S.D. Wollenweber. *Performance of a BGO PET/CT with higher resolution PET detectors*. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* (2005).
DOI: 10.1109/NSSMIC.2005.1596701
- [14] ИИХ СО РАН: Лаборатория роста кристаллов.
URL: <http://www.niic.nsc.ru/institute/structure/2327-451-crystal-growth>
- [15] Р.Р. Ахметшин, Д.Н. Григорьев, В.Ф. Казанин, С.М. Царегородцев, Ю.В. Юдин. *Ядерная физика*, **72** (3), 512 (2009).
- [16] R.R. Akhmetshin, D.N. Grigoriev, V.F. Kazanin, A.E. Kuzmenko, Yu. Yudin. *J. Instrumentation*, **9**, C10002 (2014).
- [17] В.М. Аульченко, Д.А. Епифанов, А.Н. Козырев, И.Б. Логащенко, А.С. Попов, А.А. Рубан, А.Н. Селиванов, А.А. Талышев, В.М. Титов, Ю.В. Юдин, Л.Б. Эпштейн. *Автометрия*, **51** (1), 31 (2015).
- [18] S. Ritt, P. Arnaudruz, K. Olchanski. *MIDAS (Maximum Integration Data Acquisition System)*.
URL: <http://midas.triumf.ca>
- [19] A. Anisenkov, D. Zhadan, I. Logashenko. *EPJ Web of Conf.*, **214**, 01049 (2019). DOI: 10.1051/epjconf/201921401049