

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОТОТИПА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА PHOS ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЕГО МОДЕРНИЗАЦИИ НА ПУЧКЕ ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА В ЦЕРН

## OPERABILITY PROVISION FOR A PROTOTYPE OF ELECTROMAGNETIC CALORIMETER PHOS AT FULFILLING ITS MODERNIZATION WITH THE USE OF PROTON SYNCHROTRON BEAM IN CERN

*А. Д. Тумкин, Д. В. Будников, А. В. Курякин, В. А. Деманов, С. В. Фильчагин,  
О. П. Вихлянцев, Д. В. Грачев, Г. А. Шмонин*

*A. D. Tumkin, D. V. Budnikov, A. V. Kuryakin, V. A. Demanov, S. V. Filchagin, O. P. Vikhlyantsev,  
D. V. Grachev, G. A. Shmonin*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

В настоящее время рабочей температурой электромагнитного калориметра PHOS эксперимента ALICE является  $T = -25$  °С. При этой температуре энергетическое разрешение калориметра в три раза лучше, чем при  $T = +20$  °С. Однако, низкая температура требует герметичного корпуса и усложняет эксплуатацию калориметра. Стабилизация температуры калориметра PHOS в области положительных значений без ухудшения его основной спектрометрической характеристики – энергетического разрешения позволила бы значительно упростить его конструкцию. Такая возможность предоставляется при увеличении площади фотодетекторов.

Currently the operating temperature of electromagnetic calorimeter PHOS of ALICE experiment is  $T = -25$  °C. At such temperature the energy resolution of the calorimeter is three times better than at  $T = +20$  °C. However, low temperature requires sealed container and complicates the calorimeter operation. Temperature stabilization of calorimeter PHOS in the range of positive values with no worsening of its basic spectrometric characteristic – energy resolution – would make it possible to simplify its design considerably. Such opportunity is presented at increasing the area of photodetectors.

### Введение

Калориметры в современной физике высоких энергий используются для измерения полной энергии частиц, образующих в калориметре электромагнитный и адронный ливни. Калориметры обычно представляют собой спектрометры, состоящие из большого числа детектирующих элементов, перекрывающих значительный телесный угол (иногда практически до полного телесного угла величиной  $4\pi$ ) [1].

Электромагнитный калориметр PHOS (PHOton Spectrometer) разработан для измерения энергии частиц образующихся при столкновении тяжелых ионов в эксперименте ALICE (A Large Ion Collider Experiment) [2, 3] на коллайдере LHC в CERN, Женева, Швейцария. Калориметр PHOS содержит 14336 детектирующих каналов в 4-х мо-

дулях по  $64 \times 56$  ячеек, изготовленных из кристаллов вольфрамата свинца  $PbWO_4$  (далее PWO) с поперечным сечением  $22 \times 22$  мм и длиной 180 мм. Преобразование света сцинтилляций от электромагнитного ливня в электрический заряд осуществляется с помощью лавинных фотодиодов (далее ЛФД) S8664-55 производства HAMAMATSU с чувствительной областью площадью  $(5 \times 5)$  мм<sup>2</sup>, установленных на торце кристалла.

Температурная зависимость световыхода в кристалле PWO имеет коэффициент  $2\%/^{\circ}C$  в относительно большом интервале температур [4], таким образом открывается техническая возможность увеличения световыхода за счет понижения его температуры. Рабочей температурой PHOS была выбрана температура минус  $25$  °С, до которой охлаждаются детектирующие элементы. По

сравнению с работой при комнатной температуре световыход кристаллов PWO увеличивается в 3 раза, а шумы ЛФД уменьшаются.

Однако охлаждение детектирующих элементов до температуры минус 25 °С, значительно усложняет конструкцию калориметра PHOS (герметичный корпус, разделение холодного и теплого объема в детекторе, поддержание минимального уровня влажности в объеме детектора). Также требуется достаточно мощная холодильная машина, позволяющая поддерживать долговременную температурную стабилизацию детектирующих элементов не хуже  $\pm 0,1$  °С.

В настоящее время обсуждается возможность модернизации электромагнитного калориметра PHOS с целью поиска возможных решений, позволяющих эксплуатировать калориметр без ухудшения характеристик в диапазоне положительных температур (выше точки росы). Для этого проводятся экспериментальные исследования при комнатной температуре спектрометрических характеристик прототипа электромагнитного калориметра PHOS с фотоприемниками двух типов:

– лавинными фотодиодами HAMAMATSU S8664-1010 с чувствительной площадью  $(10 \times 10)$  мм<sup>2</sup>;

– матриц 2×2 из кремниевых фотоумножителей HAMAMATSU S12572-015C с суммарной чувствительной площадью  $(6 \times 6)$  мм<sup>2</sup>.

### 1. Подготовка к проведению экспериментов

В 2017 году в рамках поиска возможных путей модернизации электромагнитного калориметра PHOS совместно с международной коллаборацией эксперимента проведены исследования каналов регистрации (рис. 1, поз. 1) с различными типами фотодетекторов на тестовых пучках синхротрона PS в ЦЕРН (в диапазоне импульсов от 1 до 10 ГэВ/Кл).

Цель экспериментов – изучение характеристик детекторов (рис. 1, поз. 2) при стабилизации температуры в области положительных значений. Для эксперимента в 2017 году были оптимизированы предварительные усилители (рис. 1, поз. 3) для новых ЛФД с большей площадью.

Для измерений на пучке были собраны четыре сборки в виде матриц 3×3 и установлены в прототипе электромагнитного калориметра PHOS, описанном в [5]. Этот прототип позволяет размещать до 256 детектирующих элементов в виде матрицы размером 16×16. В первой матрице (рис. 2, а,

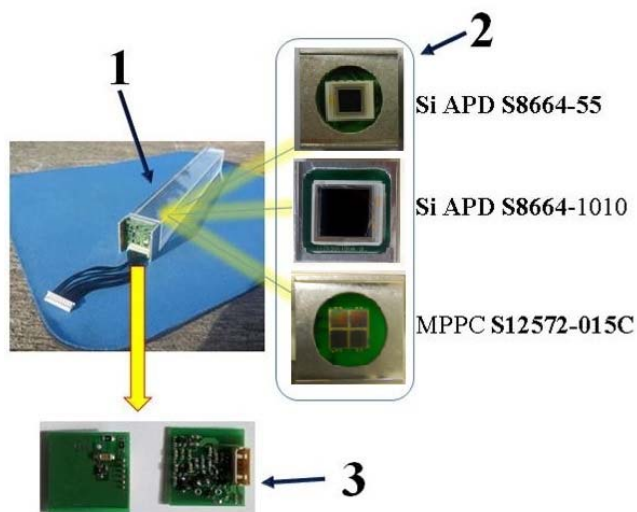
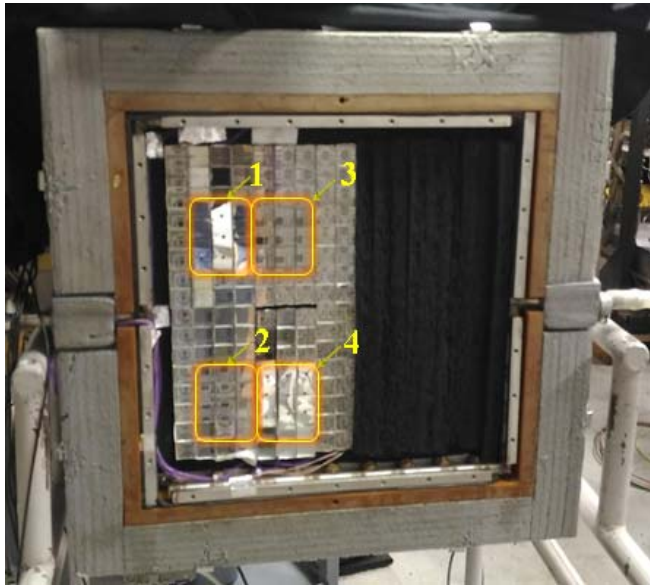


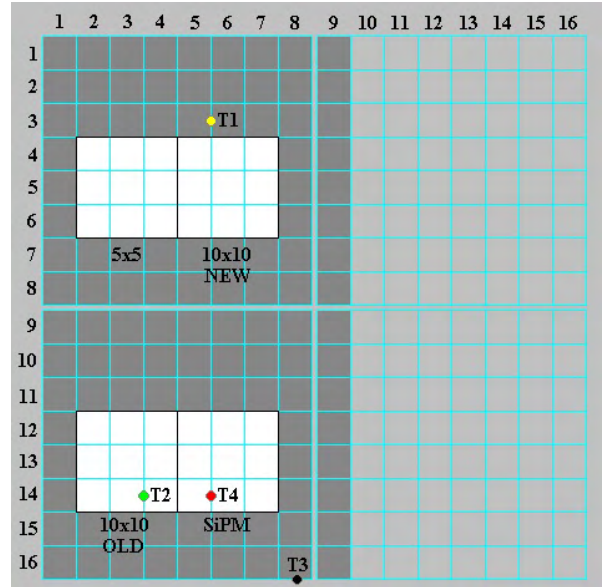
Рис. 1. Единичный канал регистрации на базе кристалла PWO. 1 – канал регистрации, 2 – лавинные фотодиоды и матрица кремниевого фотоумножителя 3 – предварительный усилитель

поз. 1), для сравнительного анализа, использовались стандартные детекторы APD S8664-55 размером 5×5 мм, которые установлены на кристаллах электромагнитного калориметра PHOS. Вторая матрица (рис. 2, а, поз. 2) собрана с использованием детекторов APD S8664-1010 большей площади (размер детекторов 10×10 мм). Большая площадь детекторов должна обеспечить то же энергетическое разрешение, что и детекторы меньшей площади, но при этом рабочая температура стабилизации будет плюсовая, выше точки росы. Для предварительного усиления сигналов с детекторов использовалась электроника, участвующая в эксперименте в 2016 году. В третьей сборке (рис. 2, а, поз. 3) использовались такие же детекторы, что и во второй – APD S8664-1010 большей площади, но для предварительного усиления использовались предварительные усилители, оптимизированные под геометрию ЛФД 10×10 мм. В четвертой матрице (рис. 2, а, поз. 4) использовались детекторы типа MPPCS12572-015C – кремниевые фотоумножители.

После установки всех матриц в прототипе калориметра PHOS оставшееся свободное пространство было заполнено теплоизоляцией, а пустые ячейки заполнены кристаллами PWO для увеличения массивности модуля. Заполнение модуля кристаллами PWO, не участвующими в эксперименте, позволило повысить инертность и обеспечить лучшую стабилизацию температуры в массиве кристаллов.



а – внешний вид со стороны кристаллов PWO



б – размещение температурных датчиков

Рис. 2. Прототип электромагнитного калориметра PHOS

Для стабилизации температуры в области положительных значений, контроля температуры в массиве кристаллов PWO прототипа калориметра PHOS и управления мобильным холодильным комплексом в автоматическом режиме использовалась автоматизированная система контроля и управления (АСКУ). АСКУ включает в себя платиновые датчики температуры, модули аналогового и дискретного ввода/вывода серии I-7000 фирмы ICP DAC. Прикладное программное обеспечение разработано на базе инструментального пакета CRW-DAQ [6]–[7]. Контроль температуры кристаллов PWO в прототипе калориметра PHOS осуществлялся с помощью четырех резистивных датчиков температуры типа Pt100 (тонкопленочные платиновые датчики типа IST SMD1206). Датчики размещались в зазорах между кристаллами PWO на глубине 100 мм, что позволило измерять непосредственную температуру кристаллов. Схема размещения температурных датчиков T1–T4 показана на рис. 2, б.

## 2. Проведение экспериментов

Эксперименты проводились на выводе вторичного пучка T9 протонного синхротрона PS в диапазоне импульсов 1–10 ГэВ/Кл. На месте проведения эксперимента была проведена адаптация АСКУ мобильным холодильным комплексом к условиям проведения эксперимента на тестовом пучке. Прототип калориметра PHOS и мобильный холодильный комплекс были размещены в зоне T9

проведения пучковых тестов на ускорителе PS (рис. 3).

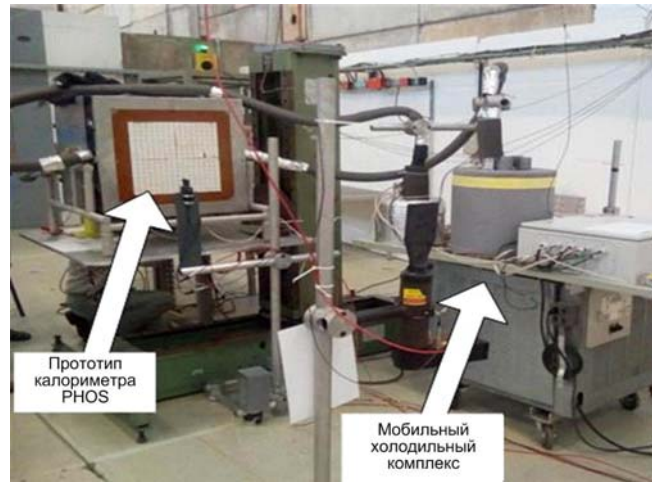


Рис. 3. Размещение прототипа калориметра PHOS и мобильного холодильного комплекса в зоне T9

После размещения оборудования в зоне проведения эксперимента было выполнено подключение прототипа калориметра PHOS к мобильному холодильному комплексу и заполнение его теплоносителем. Далее выполнено подключение оборудования к электрической сети. В ходе работ по настройке системы контроля и управления мобильным холодильным комплексом к условиям проведения эксперимента выбран следующий алгоритм работы: включение компрессора при температуре теплоносителя 20 °С, выключение компрессора при температуре теплоносителя 16 °С. Один цикл работы компрессора составлял около

8 минут. Данный режим работы компрессора обеспечил среднюю температуру в матрице кристаллов PWO на уровне значения  $T = 17,59 \pm 0,06 \text{ }^\circ\text{C}$ , что в свою очередь обеспечило постоянство коэффициента световыхода. График средней температуры в матрице кристаллов PWO в прототипе калориметра PHOS по температурному датчику T1 представлен на рис. 4. Датчик T1 располагался в непосредственной близости к кристаллам, которые были собраны с использованием детекторов APD S8664-1010 и с предварительными усилителями, оптимизированными под геометрию данных детекторов. Из графика видно три участка, когда температура в матрице кристаллов опускалась ниже  $17,53 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это происходило вследствие переключения типов детекторов к считывающей электронике, что влекло за собой изменение тепловой нагрузки и, соответственно, более резкому изменению температуры. В данные моменты измерения не проводились.

При измерениях прототип калориметра PHOS располагался на дистанционно-управляемом столе с возможностью перемещения по горизонтальной и вертикальной осям. Стол использовался для юстировки матриц кристаллов относительно пучка частиц. Фокус пучка находился на расстоянии 1 м за прототипом. Поперечные размеры счетчиков триггера и выбранное положение фокуса пучка позволяли равномерно облучать все 9 детектирующих элементов находящихся под пучком матрицы кристаллов PWO  $3 \times 3$ .

Главной целью пучковых испытаний было определение энергетического разрешения детектирующих элементов с ЛФД большей площади. В

результате для ЛФД размером  $10 \times 10 \text{ мм}$  было получено относительное энергетическое разрешение в области энергий ниже 10 ГэВ (рис. 5, а), где основной вклад в энергетическое разрешение вносят шумы электроники и статистические флуктуации электромагнитного ливня (зеленая линия – энергетическое разрешение для действующих детектирующих элементов в калориметре PHOS с ЛФД  $5 \times 5 \text{ мм}$  при минус  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , синяя линия – энергетическое разрешение для ЛФД  $10 \times 10$  при  $17,59 \text{ }^\circ\text{C}$  полученное по результатам измерений в 2017 году). Из графика видно, что увеличение чувствительной площади ЛФД в 4 раза полностью компенсирует охлаждение до минус  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  с точки зрения отношения сигнал/шум. Энергетическое разрешение становится даже лучше на величину  $\sim 20 \%$  при низких энергиях по сравнению с ЛФД  $5 \times 5 \text{ мм}$  калориметра PHOS, полученных при минус  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В процессе проведения эксперимента также измерялось временное разрешение для каждого детектора отдельно. Ставилась задача получения временного разрешения порядка 500 пс в диапазоне энергий 1–1,5 ГэВ. Результаты по временным характеристикам извлекались из тех же данных, что и результаты по энергетическому разрешению. Обычно, для изучения временных свойств для диапазона энерговыделения от 1 до 1,5 ГэВ брались данные при энергии пучка в диапазоне от 1,5 до 3 ГэВ. При такой энергии в детектирующем элементе выделяется достаточно энергии, что позволяет определить с хорошей точностью временное разрешение при энерговыделении 1 ГэВ

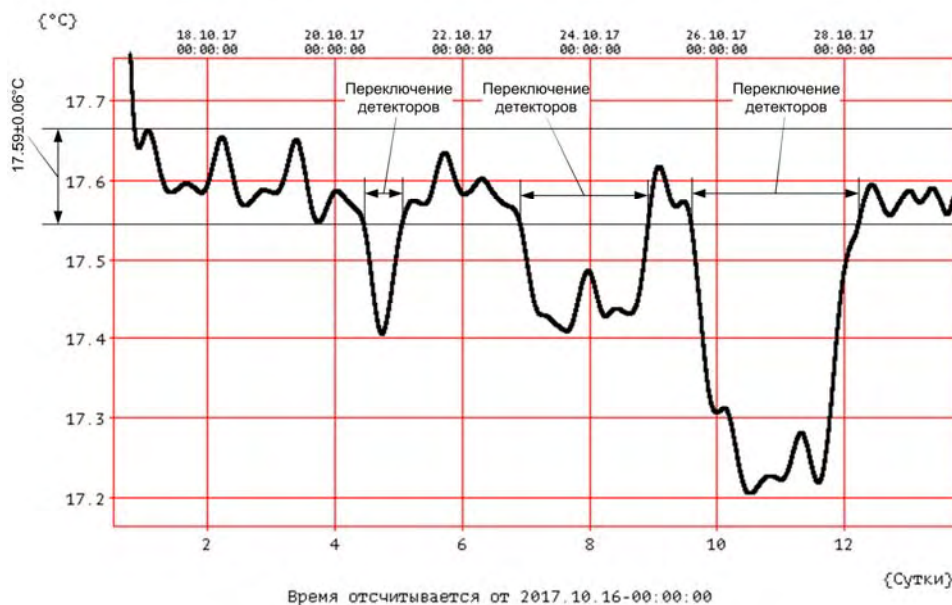
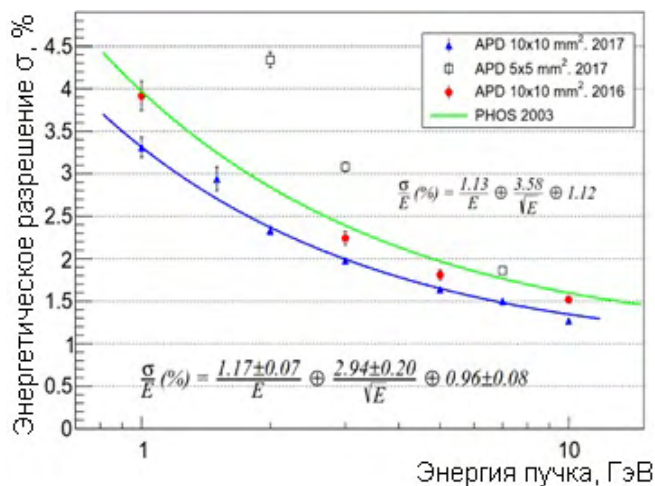
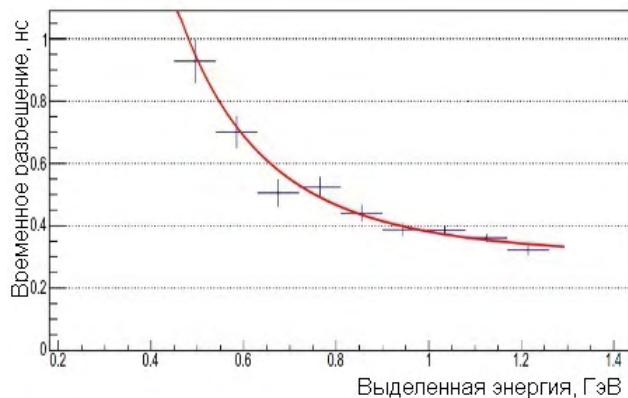


Рис. 4. Средняя температура матрицы кристаллов PWO в прототипе калориметра PHOS



а – энергетическое разрешение с различными ЛФД



б – временное разрешение с ЛФД 10×10 мм

Рис. 5. Характеристики сборок кристаллов PWO с ЛФД

в детектирующем элементе. Временное разрешение измерялось для каждого типа детекторов. Для ЛФД размером 5×5 мм при энерговыделении 1 ГэВ временное разрешение оказалось хуже 2 нс, для ЛФД размером 10×10 мм временное разрешение может быть получено на уровне 400 пс (рис. 5, б).

Для детектирующих элементов с матричными кремниевыми фотоумножителями S12572-015C уточнялось временное разрешение в зависимости от напряжения смещения при положительных температурах, которое по результатам измерения было лучше 300 пс.

Ранее в 2016 году были получены результаты по энергетическому разрешению для кремниевых фотоумножителей S12572-015C, которые показали, что принципиальная нелинейность данных детекторов не позволяет использовать единственный фотодетектор во всем требуемом энергетическом диапазоне. Нелинейность приводит к ухудшению энергетического разрешения. Возможно, что установка двух разных фотоумножителей решит эту проблему. При этом один из них используется при малых энергиях, а перед вторым устанавливается оптический фильтр, который уменьшает количество попавших фотонов, таким образом, обеспечивая линейность при высоких энергиях.

### 3. Заключение

В ходе подготовки к тестовым измерениям на пучке ускорителя PS была выполнена сборка отдельных элементов прототипа электромагнитного калориметра PHOS. В октябре 2017 года прототип PHOS с системой охлаждения и термостабилиза-

ции был смонтирован на вторичном пучке T9 ускорителя PS, где проводились измерения при энергии электронов от 1 до 10 ГэВ. На всем протяжении экспериментов с различными типами детекторов и электроники была обеспечена одинаковая температура матрицы кристаллов PWO со стабильностью не хуже  $\pm 0,1$  °C, что позволило получить качественные сравнительные данные по энергетическому разрешению.

Эксперименты, проведенные на вторичных пучках T9 ускорителя PS в CERN показали возможность модернизации электромагнитного калориметра PHOS эксперимента ALICE. Модернизация предусматривает обеспечение возможности работы при комнатной температуре без ухудшения основной спектрометрической характеристики действующего электромагнитного калориметра PHOS – энергетического разрешения, что подтверждает полученное энергетическое разрешение для сборки из ЛФД S8664-1010 при температуре  $T = +17,6$  °C, которое лучше на величину  $\sim 20$  %, чем энергетическое разрешение для ЛФД S8664-55 при  $T = -25$  °C. При этом достигнуто временное разрешение порядка 500 пс.

Кремниевые фотоумножители S12572-015C имеют лучшее временное разрешение, но они не линейны во всем диапазоне энергий, что приводит к ухудшению энергетического разрешения. Для расширения линейности требуется проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований по оптимизации выборов режимов работы, свойств и материалов оптических фильтров.

Изменение рабочей температуры электромагнитного калориметра PHOS с  $T = -25$  °C в область положительных температур позволит значительно

упростить конструкцию, как самого калориметра, так и его системы охлаждения. Это открывает широкие возможности по модернизации корпуса калориметра PHOS, а именно изготовление новой задней крышки с возможностью доступа к платам считывающей электроники для ремонта или замены вышедших из строя компонентов. В настоящий момент доступ, к платам считывающей электроники доступен только при извлечении калориметра из шахты эксперимента, что возможно только при длительных остановках коллайдера LHC.

### Список литературы

1. Wigmans R. *Calorimetry. Energy Measurements in Particle Physics*. Oxford: Clarendon Press, 2008.

2. Photon Spectrometer PHOS, Alice Technical Design Report, CERN/LHCC 99-4, ALICE TDR 2, 5 March 1999, ISBN 92-9083-138-3.

3. The ALICE Collaboration, Performance of the ALICE experiment at the CERN LHC // *Int. J. Mod. Phys. A* 29, 1430044 (2014).

4. Коржик М. В. Кристаллы вольфрамата свинца – основа электромагнитной калориметрии в экспериментах CMS и ALICE на LHC // *Вестник БГУ. Сер. 1*. 2011, № 3. С. 57–61.

5. Aleksandrov D. V., Vinogradov Y. I., Kuryakin A. V. et al. A high resolution electromagnetic calorimeter based on lead-tungstate crystals // *Nucl. Instrum. Meth. A*, 2005. Vol. 550. P. 169–184.

6. Курякин А. В., Виноградов Ю. И. Программное обеспечение автоматизированных измерительных систем в области тритиевых технологий. ВАНТ, серия «Термоядерный синтез». 2008. Вып. 2. С. 80–90.

7. Курякин А. В. Автоматизация физических экспериментов на тритиевых комплексах исследовательских установок «ТРИТОН», «АКУЛИНА» и «ПРОМЕТЕЙ». Диссертация кандидата физ.-мат. наук. Дубна 2010 г.