

## МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ СЧИТЫВАНИЯ СВЕТА В ЖИДКОМ АРГОНЕ

*А. С. Селюнин<sup>1</sup>, Н. В. Анфимов, К. И. Кузнецова, А. В. Рыбников,  
Д. В. Федосеев, О. Б. Самойлов, С. А. Соколов, А. В. Четвериков*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлена методика изучения в жидком аргоне компонент системы считывания света жидкоаргоновой время-проекционной камеры (ЖА-ВПК) ближнего детектора эксперимента DUNE. В рамках методики проведены сравнительные испытания на криогенной установке полноразмерного светосчитывающего модуля для жидкоаргоновой время-проекционной камеры и укороченного модуля. Эффективность регистрации света полноразмерного модуля по результатам испытаний на  $\sim 5\%$  меньше, чем у укороченного модуля. Показана применимость полноразмерного модуля в конструкции для ЖА-ВПК ближнего детектора эксперимента DUNE.

The paper presents a method for studying in liquid argon the components of the light detection system of the Liquid Argon Time-Projection Chamber (LArTPC) of the Near Detector of the DUNE experiment (DUNE ND). In its framework, comparative tests of a full-scale Light Collection Module for a liquid argon time-projection chamber and a shortened Module were carried out using cryogenic stand. The light detection efficiency of the full-scale module according to the study results is  $\sim 5\%$  less than that of the shortened module. The applicability of the full-scale module in the construction of the DUNE Near Detector is shown.

PACS: 29.40.Cs

### 1. ДЕТЕКТОРЫ СВЕТА ЖИДКОАРГОНОВОЙ ВРЕМЯ-ПРОЕКЦИОННОЙ КАМЕРЫ

Жидкоаргоновые время-проекционные камеры традиционно используют проволочные плоскости для системы считывания заряда. Такие проволочные ЖА-ВПК широко применяются в нейтринных экспериментах, таких как MicroBooNE [1], ICARUS [2], ProtoDUNE-SP [3, 4], ArgoNeuT [5] и др. Однако этот подход приводит к неопределенностям в реконструкции информации о заряде для ЖА-ВПК, используемых в ближних детекторных комплексах нейтринных экспериментов, где наблюдаются высокие счета нейтринных взаимодействий и интенсивный поток мюонов.

---

<sup>1</sup>E-mail: selyunin@jinr.ru

В частности, трехмерная реконструкция заряда ограничена из-за наложения зарядовых кластеров в одной или нескольких проекциях, и связь между извлеченным зарядом и отдельным взаимодействием становится недостижимой. Для решения этой проблемы был предложен новый подход к конструкции ВПК, который разрабатывается в рамках создания ЖА-ВПК для ближнего детектора эксперимента DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment), расположенного в лаборатории Ферми (Fermilab, США) вблизи источника нейтрино.

Новая конструкция ВПК включает три нововведения по сравнению с традиционными проволочными ВПК: пиксельную систему считывания заряда для точной пространственной реконструкции, высокофункциональную систему считывания света для быстрого и эффективного детектирования сцинтилляционного света, а также модульную конструкцию с оптически изолированными сегментами. Сегментация позволяет достичь уменьшения загрузки сигналов в обеих системах считывания, обеспечивая эффективную реконструкцию и однозначное соотнесение световых и зарядовых сигналов.

На систему считывания света в такой конструкции ЖА-ВПК наложен ряд требований: диэлектрические материалы в конструкции детекторов света, позволяющих их установку в области высоких электрических полей; большая область покрытия для эффективного детектирования света с больших площадей; минимальные размеры для уменьшения мертвого объема, занимаемого внутри ВПК.

В Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований ведется разработка системы считывания света для такой ЖА-ВПК [6]. В качестве детектора света был предложен светосчитывающий модуль, в основе конструкции которого лежат спектросмещающие волокна Y-11 фирмы Kugaгау диаметром 1,2 мм [7], закрепленные на основании из пластика при помощи прижимных пластмассовых планок. Волокна изогнуты петлей на одной из сторон основания и на другой его стороне сведены в два пучка, закрепленных в прижимной планке (рис. 1). Свет с пучков

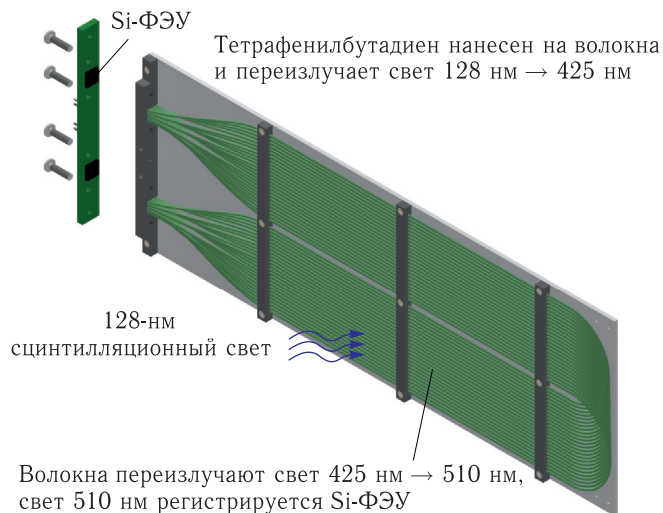


Рис. 1. Конструкция светосчитывающего модуля

волокон такого модуля регистрируется при помощи кремниевых фотоумножителей (Si-ФЭУ). Для регистрации сцинтилляционного света в жидком аргоне на волокна наносится слой из тетрафенилбутадиена. Этот материал переизлучает сцинтилляционный свет (128 нм) в область видимого света с пиковой длиной волны 428 нм. Тетрафенилбутадиен широко используется в системах регистрации сцинтилляционного света в жидком аргоне и является одним из самых эффективных преобразователей вакуумного ультрафиолета в видимую область [8].

В процессе разработки системы считывания света необходимо проводить изучение характеристик компонент системы для оценки предложенных конструктивных особенностей. Для этих целей в ЛЯП ОИЯИ была разработана методика, которая позволяет исследовать характеристики компонент системы считывания света в жидком аргоне на криогенной установке, в том числе светосчитывающие модули. Особенностью методики исследования светосчитывающих модулей на установке является одновременное испытание двух образцов световых детекторов, что позволяет проводить относительное сравнение их параметров. Если характеристики одного из образцов известны, то в установке можно использовать технический жидкий аргон с условно известным уровнем чистоты<sup>1</sup>. Таким образом, в установке не используются сложные системы очистки и контроля чистоты жидкого аргона, что существенно упрощает ее конструкцию.

В настоящей работе представлена методика и конструкция криогенной установки для изучения характеристик систем считывания света в жидком аргоне. Также представлены результаты испытаний двух типов прототипов светосчитывающих модулей на установке.

## 2. СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОСЧИТЫВАЮЩИХ МОДУЛЕЙ

**2.1. Криогенная установка.** Методика изучения светосчитывающих модулей заключается в проведении натуральных испытаний детекторов света непосредственно в жидком аргоне при криогенных температурах с использованием криогенной установки. Таким образом, нами создана криогенная установка, которая показана на рис. 2. Установка состоит из двух криогенных сосудов — транспортировочного (1) и сосуда (4), где располагаются детекторы света, электроника и источник альфа-частиц. По криогенному металлорукаву (2) осуществляется подача жидкого аргона из транспортировочного сосуда (1) в сосуд (4). На фланце (3) располагаются переходные разъемы, которые позволяют заводить внутрь криостата (4) кабели, необходимые для проведения испытаний. В установке используется технический жидкий аргон, широко доступный на рынке, с уровнем чистоты  $\sim 99,9999\%$ . Такой чистоты аргона достаточно для возникновения в нем значительного количества сцинтилляционного света при прохождении заряженной частицы (альфа-частицы или мюона), что необходимо для проведения исследований детекторов света.

Детализированная конструкция криогенного сосуда с детекторами представлена на рис. 3. На фланце (5) закреплены две штанги (4) и (7). На штанге (7) установлена система подвеса двух светосчитывающих модулей (1), которые крепятся друг

---

<sup>1</sup>Поскольку световыход зависит от чистоты аргона, ее необходимо определить для проведения абсолютных измерений.

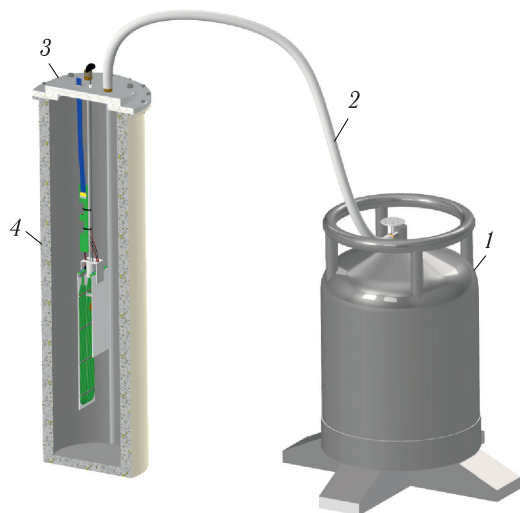


Рис. 2. Криогенная установка, состоящая из двух криогенных сосудов: транспортировочный сосуд (1) и сосуд (4), где расположены детекторы (2 — криогенный рукав; 3 — фланец)

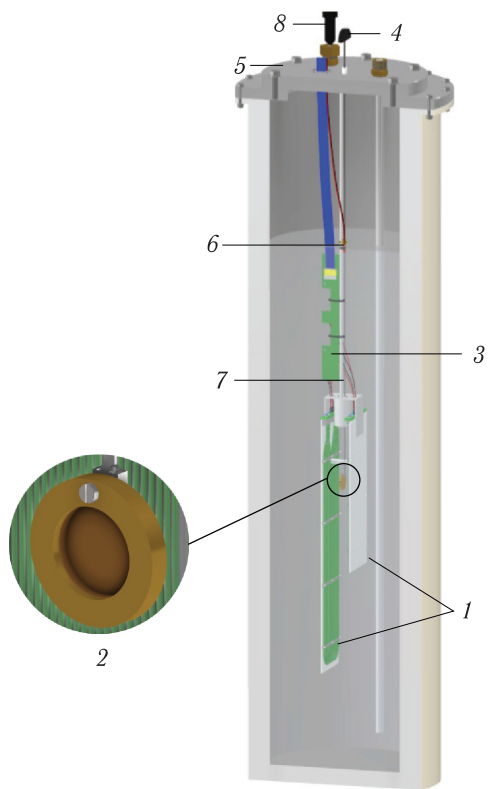


Рис. 3. Компоненты конструкции криогенного сосуда с расположенными внутри светосчитывающими модулями (1): 2 —  $\alpha$ -источник; 3 — плата предусилителей; 4 — поворотная штанга; 5 — фланец; 6 — термодатчик; 7 — штанга; 8 — источник света

напротив друга. Кроме того, к штанге (7) выше уровня расположения модулей (1) фиксируются печатная плата предусилителей (3) с подведенными кабелями и термодатчик (6), используемый для определения уровня жидкого аргона при заполнении криогенного сосуда. Заполнение жидким аргоном криогенного сосуда с детекторами осуществляется в медленном режиме, с предварительным плавным охлаждением внутреннего объема посредством газообразного аргона из транспортировочного сосуда с последующей подачей жидкого аргона. Так исключаются механические повреждения компонентов при их резком охлаждении внутри криостата за счет термического сжатия. Поворотная штанга (4) удерживает источник  $\alpha$ -частиц (2) на равноудаленном расстоянии между двумя детекторами света (светосчитывающими модулями) (1) и позволяет вращать его на  $360^\circ$ . Альфа-источник — это источник открытого типа, состоящий из тонкой пленки с нанесенным на ее поверхность  $^{241}\text{Am}$ , которая крепится на медной подложке. У такого источника  $\alpha$ -частицы с энергией 5,64 МэВ при вылете с поверхности пленки почти не теряют свою первоначальную энергию. Направляя такой источник на исследуемый детектор света,  $\alpha$ -частицы инициируют сцинтилляционный свет в жидком аргоне, который регистрируется детектором света. Сравнивая результаты светосбора двух детекторов, полученных в одном испытании, можно оценить разницу в характеристиках между этими детекторами. Необходимо отметить, что можно проводить испытания и с одним детектором света, если это требуется, например, при сравнении откликов при разных  $dE/dx$  — от  $\alpha$ -частиц и при прохождении объема сосуда с аргоном атмосферным мюоном. В последнем случае требуется дополнительно использовать триггерную систему (например, два сцинтилляционных счетчика над и под криогенным сосудом) для отбора событий, соответствующих прохождению мюона через объем сосуда. На фланце также можно установить внешний источник света (8), необходимый при проведении калибровки кремниевых фотоумножителей.

Блок-схема считывания сигнала с кремниевых фотоумножителей представлена на рис. 4. Кремниевые фотоумножители соединены с платой предусилителей, откуда осуществляется их питание и происходит считывание сигнала. На этой плате сигнал предварительно усиливается с коэффициентом усиления  $k = 5$  для передачи сигнала на длинную кабельную линию, соединяющую предусилитель и усилитель. Затем сигнал с усилителя поступает в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для оцифровки и последующей передачи на ПК для анализа. Детальное описание цепочки считывания сигнала с кремниевого фотоумножителя представлено в работе [6].

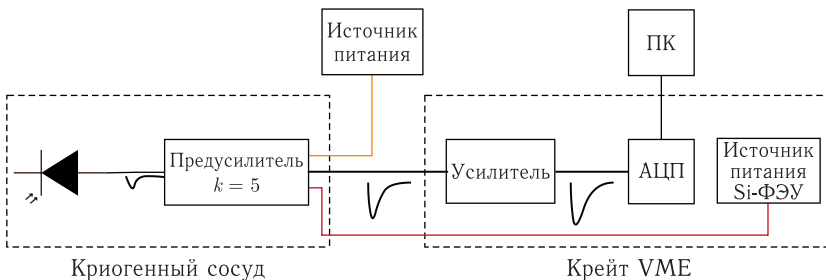


Рис. 4. Блок-схема считывания сигнала с кремниевого фотоумножителя

Представленная в работе установка позволяет испытывать также элементы цепочки считывания сигнала с Si-ФЭУ, которые погружены в жидкий аргон и работают при криогенных температурах (предусилитель, кабели).

**2.2. Изучение светосчитывающих модулей.** В рамках изучения технологий и характеристик подсистем модульной жидкоаргоновой время-проекционной камеры с пиксельным считыванием заряда ведутся работы по созданию и исследованию 4 прототипов таких ВПК с размерами рабочей части отдельной камеры по основанию  $600 \times 600$  мм и высотой 1200 мм [9]. Катодная плоскость в такой камере физически делит ее объем на две независимые ВПК размерами  $300 \times 600 \times 1200$  мм. Для этих прототипов нами были разработаны и изготовлены светосчитывающие модули размерами  $275 \times 99,5 \times 10$  мм (рис. 5), которые были полноценно изучены во время испытаний прототипов ВПК в университете Берна<sup>1</sup>. Для ближнего детектора эксперимента DUNE планируется использовать ВПК аналогичной конструкции большего размера с основанием  $1000 \times 1000$  мм и высотой 3000 мм [10]. Полноразмерная камера также будет оборудована светосчитывающими модулями удлиненной конструкции. Полноразмерный прототип светосчитывающего модуля с размерами  $461,7 \times 98 \times 10$  мм (см. рис. 5) также разработан и изготовлен нашей группой. Его конструкция аналогична светосчитывающим модулям прототипа ВПК, однако требует использования более длинного спектросмещающего волокна (более чем в 1,5 раза). В результате возможны ухудшения некоторых характеристик полноразмерного прототипа.

Для изучения эффективности регистрации света у прототипа полноразмерного светосчитывающего модуля были проведены его испытания на криогенной установке совместно с укороченным светосчитывающим модулем, используемым в прототипах ЖА-ВПК. Такое испытание позволяет провести сравнительный анализ характеристик двух образцов. В конструкции полноразмерного модуля применяется тот же тип волокна Kugaгау Y-11(175MSJ), что и для укороченного. На оба модуля одинаковым способом был нанесен слой тетрафенилбутадиена, что исключает влияние этого слоя на совместные результаты характеристик образцов в испытании.

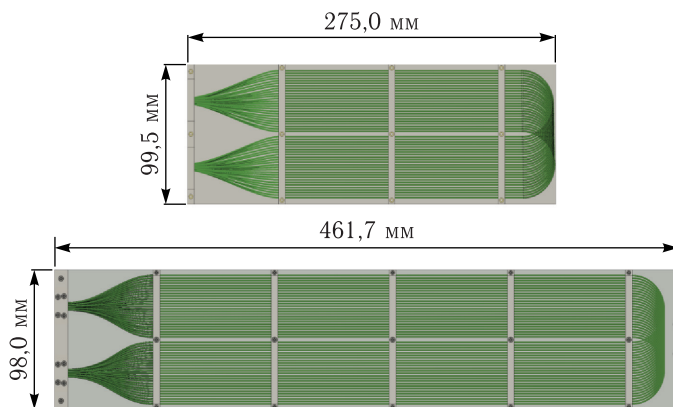


Рис. 5. Светосчитывающие модули прототипа модуля ЖА-ВПК и полноразмерного модуля ВПК ближнего детектора эксперимента DUNE

<sup>1</sup>По результатам испытаний готовится коллаборационная публикация.

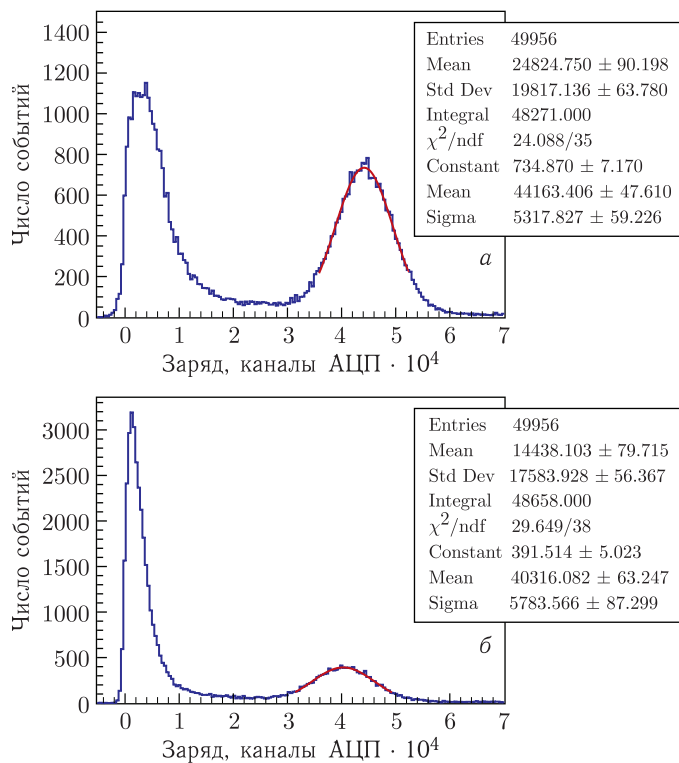


Рис. 6. Зарядовые спектры полноразмерного модуля (б) и укороченного прототипа модуля от  $\alpha$ -источника (а)

На рис. 6 приведены зарядовые спектры на одном из каналов Si-ФЭУ у двух светосчитывающих модулей, которые были получены в испытании на криогенной установке с использованием  $\alpha$ -источника. Общий отклик с модулей определялся по сумме сигналов с двух кремниевых фотоумножителей. По результатам испытаний было получено, что эффективность регистрации света полноразмерного прототипа светосчитывающего модуля меньше примерно на 5% по сравнению с аналогичной величиной укороченного модуля. За счет большей длины прототипа на него сильнее влияет термическое сжатие при низких температурах. В испытании также была подтверждена механическая прочность конструкции полноразмерного прототипа светосчитывающего модуля в условиях криогенных температур.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ЛЯП ОИЯИ нами разработана методика изучения характеристик светосчитывающих модулей, а также компонент системы считывания света ЖА-ВПК в жидком аргоне на криогенной установке, где нами проводились сравнительные испытания двух светосчитывающих модулей — полноразмерного прототипа светосчитывающего модуля системы считывания света ближнего детектора эксперимента DUNE и уко-

роченного прототипа. Показано, что абсолютная эффективность регистрации света у полноразмерного прототипа светосчитывающего модуля ближнего детектора эксперимента DUNE меньше на  $\sim 5\%$  в сравнении с аналогичной величиной для укороченного прототипа. Данный результат указывает на достаточно большую величину длины затухания света в спектросмещающем волокне, используемом в конструкции модулей.

Со стороны коллаборации эксперимента DUNE к полноразмерному светосчитывающему модулю предъявляются требования к эффективности регистрации сцинтилляционного света и допускается снижение этого параметра не более чем на  $10\%$  в сравнении с укороченным прототипом. Показано, что полноразмерный светосчитывающий модуль соответствует данному требованию. Кроме того, проведенные испытания подтвердили надежность конструкции модуля при криогенных температурах, что свидетельствует о пригодности конструкции модуля для ЖА-ВПК ближнего детектора эксперимента DUNE. Полная квалификация характеристик прототипа будет получена в ходе испытаний полноразмерного прототипа ЖА-ВПК ближнего детектора эксперимента DUNE, где планируется использование 60 таких модулей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 22-22-00389).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acciarri R. et al. (*MicroBooNE Collab.*). Design and Construction of the MicroBooNE Detector // *J. Instrum.* 2017. V. 12, No. 02. P. P02017; arXiv:1612.05824.
2. Amerio S. et al. (*ICARUS Collab.*). Design, Construction and Tests of the ICARUS T600 Detector // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2004. V. 527. P. 329–410.
3. Abi B. et al. (*DUNE Collab.*). First Results on ProtoDUNE-SP Liquid Argon Time Projection Chamber Performance from a Beam Test at the CERN Neutrino Platform // *J. Instrum.* 2020. V. 15, No. 12. P. P12004; arXiv:2007.06722.
4. Abud A. A. et al. (*DUNE Collab.*). Design, Construction and Operation of the ProtoDUNE-SP Liquid Argon TPC // *J. Instrum.* 2022. V. 17, No. 01. P. P01005; arXiv:2108.01902.
5. Anderson C. et al. The ArgoNeuT Detector in the NuMI Low-Energy Beam Line at Fermilab // *J. Instrum.* 2012. V. 7. P. P10019; arXiv:1205.6747 [physics.ins-det].
6. Anfimov N. et al. Development of the Light Collection Module for the Liquid Argon Time Projection Chamber (LArTPC) // *J. Instrum.* 2020. V. 15, No. 07. P. C07022; <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/15/07/C07022>.
7. Kuraray. Plastic Fiber Series Datasheet. [https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150\\_psf01.pdf](https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf).
8. Ignarra C. M. TPB-Coated Light Guides for Liquid Argon TPC Light Detection Systems // *J. Instrum.* 2013. V. 8, No. 10. P. C10005; <https://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/8/10/C10005>.
9. Asaadi J. et al. A New Concept for Kilotonne Scale Liquid Argon Time Projection Chambers // *Instrum.* 2020. V. 4, No. 1; <https://www.mdpi.com/2410-390X/4/1/6>.
10. *DUNE Collab.* Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Near Detector Conceptual Design Report // *Instrum.* 2021. V. 5, No. 4; <https://www.mdpi.com/2410-390X/5/4/31>.

Получено 26 июля 2023 г.