

## МОДУЛЬ КАЛИБРОВКИ СВЕТОСЧИТЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПРОТОТИПА ЖИДКОАРГОНОВОЙ ВРЕМЯ-ПРОЕКЦИОННОЙ КАМЕРЫ

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

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлено устройство системы калибровки светосчитывающей системы прототипа модульной жидкоаргоновой время-проекционной камеры (ВПК) ближнего детектора эксперимента DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment). Система калибровки и ее компоненты были протестированы в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, а также во время испытаний прототипа ВПК, проводившихся в Университете Берна. По результатам испытаний показано, что система выполняет возложенный на нее функционал, позволяет осуществлять калибровку фотодетекторов системы считывания света ВПК и изучать ее временные характеристики.

The paper presents the design of a calibration system for the Light Readout System of the prototype modular Liquid Argon Time-Projection Chamber (LArTPC) of the Near Detector of the Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE). The calibration system and its components were tested at the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) and during the prototype LArTPC trials conducted at the University of Bern. The test results demonstrate that the system fulfills its intended functionality, allowing for the calibration of the photo-detectors in the light readout system of the LArTPC and the study of its timing characteristics.

PACS: 29.40.Cs; 85.60.Gz; 95.55.Vj

### ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент DUNE [1, 2] является ускорительным нейтринным экспериментом с длинной базой. Для регистрации первоначального потока нейтрино на расстоянии  $\sim 500$  м от мишени будет создан комплекс ближнего детектора [3], в составе которого первым на пути пучка нейтрино будет располагаться модульная жидкоаргоновая время-проекционная камера (ВПК) (ND LArTPC). Сегментация ВПК на модули позволяет эффективно реконструировать зарядовые и световые сигналы в условиях большой загрузки событиями. Конструктивно каждый модуль является отдельной ВПК, разделенной катодной плоскостью на две одинаковые независимые половины. Напротив катодной плоскости по обеим сторонам модуля расположены анодные плоскости с

---

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

пиксельным считыванием заряда. Также на смежных с анодными плоскостями стенках камеры вдоль электрического поля располагаются модули считывания сцинтилляционного света. Назначение системы регистрации света — обеспечение временной привязки светового сигнала к соответствующему зарядовому треку, а также разделение по времени наложенных зарядовых треков внутри ВПК. В конструкции системы регистрации света используются два типа диэлектрических компактных детекторов света: светосчитывающий модуль LCM (Light Collection Module) и ArCLight [4]. Конструкция LCM базируется на спектросмещающих волокнах Kuraray Y11, закрепленных на подложке из поликарбоната. В основе ArCLight [5, 6] лежит пластина из полистирола с добавлением зеленой спектросмещающей добавки. Принцип работы этих детекторов заключается в смещении длины волны сцинтилляционного вакуумного ультрафиолетового света (128 нм) при помощи нанесенной на детекторы спектросмещающей добавки тетрафенилбутадиена (ТРВ) в видимую область с длиной волны 428 нм. Затем происходит захват света 428 нм спектросмещающей добавкой внутри волокна/пластины, которая переизлучает его в зеленую область  $\sim 510$  нм. В итоге образовавшийся зеленый свет переотражается от границ волокна/пластины и попадает на боковую грань модулей, где считывается кремниевыми фотоумножителями Si-ФЭУ.

Для отработки технологии создания модульной жидкоаргоновой ВПК было создано 4 модуля прототипа ВПК меньшего размера. Каждый из модулей проходил испытания в криогенной лаборатории Университета Берна. По результатам испытаний первого «модуля-0» возникла необходимость в доработке конструкции ВПК по созданию дополнительной подсистемы калибровки и мониторинга для светосчитывающей системы. Такая подсистема позволяет проводить калибровку фотодетекторов светосчитывающей системы, исследовать ее временные характеристики и потенциально осуществлять мониторинг долговременной стабильности спектросмещающей добавки ТРВ при эксплуатации ВПК.

В настоящей работе приведена конструкция системы калибровки светосчитывающей системы жидкоаргоновой ВПК, описан ее функционал, а также приведены результаты испытаний, в том числе в тестах прототипа ВПК в криогенной лаборатории Университета Берна.

## 1. КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ КАЛИБРОВКИ

Система калибровки и мониторинга состоит из отдельных модулей калибровки. В конструкции модуля калибровки используется печатная плата, на которой смонтированы два светодиода и контактный разъем (рис. 1). При помощи данного разъема посредством коаксиального кабеля светодиоды соединяются с генератором импульсов. Для формирования однородного светового поля внутри объема ВПК в конструкции модуля калибровки используется рассеиватель света из тефлона, который сочленяется с печатной платой и устанавливается поверх светодиодов. Форма и размер элементов модуля калибровки спроектированы исходя из требований к габаритам системы калибровки, а также с учетом выделенной для размещения модулей позиции на боковой крепежной панели в конструкции ВПК. Два светодиода с длинами волн в максимуме спектра — 425 и 265 нм — используются в конструкции модуля и выпол-

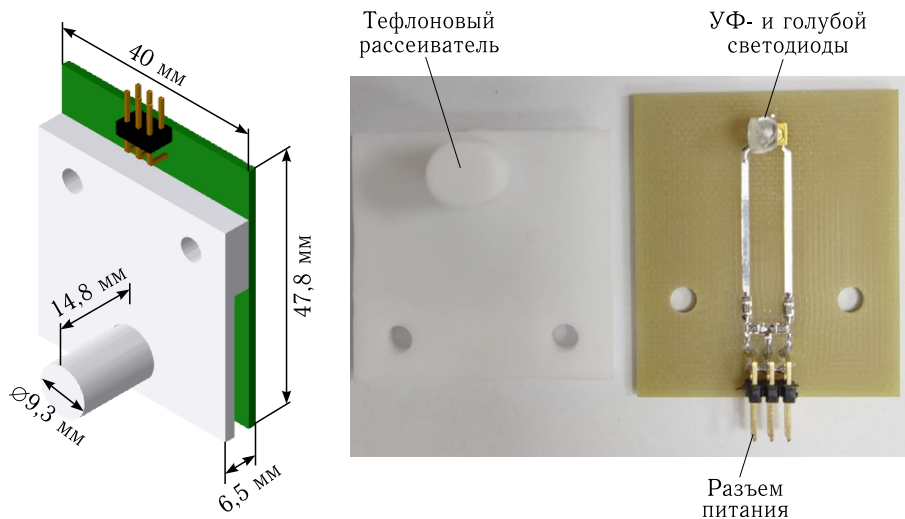


Рис. 1. Слева — 3D-модель прототипа модуля калибровки и мониторинга: сборка печатной платы со светодиодами и тефлоновым рассеивателем. Справа — изготовленные компоненты прототипа модуля

няют различные функции. Свет от светодиода с длиной волны 425 нм способен захватываться зеленой спектросмещающей добавкой (в волокнах/пластине) детекторов света и транспортируется к кремниевым фотодетекторам. Так производится калибровка параметров кремниевых фотоумножающей системы. Также можно изучать временные характеристики светосчитывающей системы, используя данный светодиод, например, временную задержку сигналов между каналами световой системы или разрешение наложенных сигналов системой при генерировании двойных импульсов со светодиода. Источник света с длиной волны 265 нм в конструкции модуля калибровки устанавливается для возможности мониторинга свойств ТРВ,

нанесенного на световые детекторы, так как такой УФ-свет им захватывается и переизлучается. При условии стабильности света от такого источника, изучая отклик световых детекторов на такой свет, можно проследить стабильность переизлучения УФ-света слоем ТРВ на световых детекторах в длительном временном диапазоне.

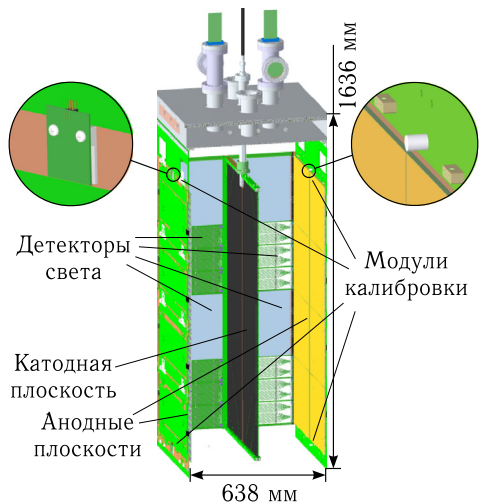


Рис. 2. Конструкция жидкоаргоновой ВПК

В прототипе ВПК устанавливалось 4 модуля калибровки, по два модуля на каждую половину камеры (рис. 2). Один модуль располагался в верхней части камеры по центру стенки над анодными плоскостями, а другой симметрично снизу. Такое расположение модулей внутри камеры обеспечивает возможность равномерной засветки детекторов света как верхней, так и нижней половин ВПК.

## 2. ТЕСТЫ МОДУЛЯ КАЛИБРОВКИ

При испытаниях УФ- и голубого светодиода в жидком азоте выяснилось, что стандартный генератор импульсов с максимальной амплитудой сигнала 5 В и длительностью порядка десятков наносекунд не способен запустить светодиод из-за смещения его рабочей точки при криогенных температурах. При комнатной температуре достаточно питающего импульса менее 5 В. Таким образом, для питания светодиодов в условиях криогенных температур требуется источник импульсов, способный обеспечить выходной импульс более 5 В и длительностью не более 50 нс. Более того, так как светодиоды модуля калибровки находятся внутри рассеивателя, который частично ослабляет свет от них, а сами модули расположены на краях стенок внутри ВПК и должны засвечивать большую область внутри объема ВПК<sup>1</sup>, амплитуда питающего импульса должна быть значительно больше 5 В для получения достаточного количества света. Для решения данной задачи был спроектирован и изготовлен усилитель импульсов стандартного генератора на базе биполярного транзистора КТ3142А. Схема усилителя приведена на рис. 3. Для работы усилителя используется внешний источник питания с напряжением 70 В. На вход усилителя подается импульс от генератора, который усиливается на транзисторе и затем запитывает светодиод модуля калибровки. Такой усилитель позволяет получать импульсы с амплитудой до 50 В и длительностью несколько десятков наносекунд. Были проведены испытания усилителя, где он успешно применялся для питания погруженных в жидкий азот светодиодов модуля калибровки, и, по итогу, получены требуемые характеристики световой вспышки.

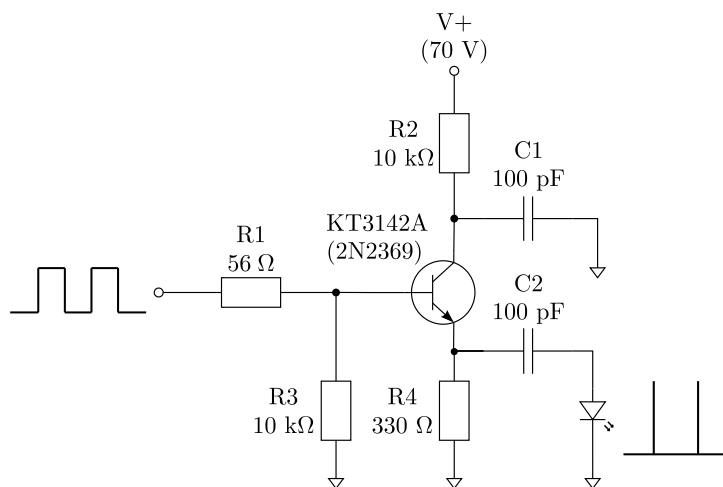


Рис. 3. Схема усилителя импульсов на базе биполярного транзистора КТ3142А

Для изучения характеристик модуля калибровки при криогенных температурах устройство погружалось в контейнер с жидким азотом. Выходящий из контейнера

<sup>1</sup>Свет должен попадать и на детекторы света, расположенные в середине объема ВПК.

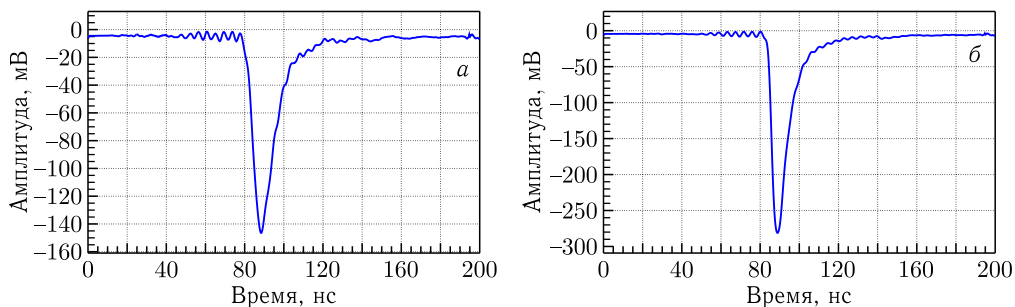


Рис. 4. Усредненная форма сигнала от голубого (а) и ультрафиолетового (б) светодиодов в условиях криогенной температуры, полученная при помощи ФЭУ Hamamatsu R1355

свет от модуля регистрировался при помощи ФЭУ Hamamatsu R1355. На рис. 4 показаны типичные формы сигналов с УФ- и голубого светодиодов при криогенной температуре.

Отдельно были проведены измерения при комнатной температуре. В таких условиях изучалась способность возбуждения слоя ТРВ на поверхности волокон LCM при помощи УФ-светодиода модуля калибровки, где один и тот же светосчитывающий модуль был засвечен УФ-светодиодом до и после покрытия его волокон спектросмещающей добавкой ТРВ. По результатам было получено, что световыход с LCM увеличился более чем в 2 раза после нанесения спектросмещающей добавки на волокна. Данный факт подтверждает возможность мониторинга функциональности покрытия ТРВ при помощи УФ-светодиода в течение длительного периода времени эксплуатации детекторов света. Необходимо отметить, что для этого требуется гарантировать стабильность света от УФ-светодиода во время измерений.

### 3. ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ КАЛИБРОВКИ

Для изучения функциональности системы калибровки и мониторинга были проведены ее испытания в тестах прототипа жидкоаргоновой ВПК в криогенной лаборатории Берна. По два модуля калибровки было установлено сверху и снизу каждой полукамеры ВПК (см. рис. 2). Испытания осуществлялись при криогенной температуре, когда сама ВПК и, соответственно, модули калибровки были погружены в криостат, который заполнялся жидким аргоном. Первоначально функциональность системы проверялась при изучении параметров кремниевых фотоумножителей, используемых в системе считывания света ВПК. Для этого была осуществлена засветка внутреннего пространства ВПК светом малой интенсивности при помощи модулей калибровки таким образом, чтобы каждый фотодетектор регистрировал одиночные фотоны. Для получения необходимой интенсивности света использовался генератор импульсов, который позволял регулировать амплитуду импульса, подаваемую на светодиоды системы калибровки. Таким образом, были получены калибровочные спектры для каждого кремниевого фотоумножителя, используемого в световой системе ВПК. Типичный калибровочный зарядовый спектр для Si-ФЭУ, полученный при помощи системы калибровки, приведен на рис. 5. Видно, что однофотозлектронные пики хорошо

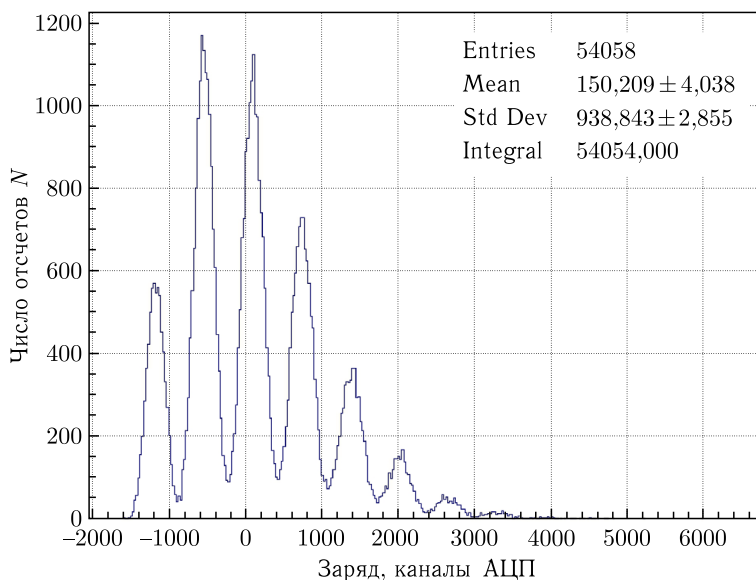


Рис. 5. Зарядовый спектр Si-ФЭУ, полученный с помощью системы калибровки

разрешаются, что позволяет выполнить калибровку Si-ФЭУ, используемых в системе считывания света.

Одной из функций системы калибровки является ее использование для измерения временных задержек между каналами системы считывания света, которые возникают из-за разницы длин кабельных линий. Засветив внутреннюю область ВПК светодиодом одного из модулей калибровки, в системе сбора данных можно определить время прихода сигнала с каждого канала Si-ФЭУ и таким образом вычислить задержки между сигналами.

Важной задачей при изучении характеристик световой системы является оценка возможности разрешения наложенных сигналов, регистрируемых световой системой. Разница времен появления таких сигналов в ВПК может варьироваться от десятков наносекунд и более. На систему регистрации света накладывается требование по разрешению таких наложенных сигналов не хуже 200 нс. Для изучения этого параметра необходимо, чтобы система калибровки была способна формировать двойные световые вспышки внутри ВПК с разницей между сигналами до десятков наносекунд. Для получения таких сигналов использовался генератор импульсов, который способен формировать двойные импульсы на светодиодах системы калибровки. На рис. 6 приведены сигналы, полученные световой системой при помощи двойных импульсов, формируемых системой калибровки. Из рис. 6 видно, что световая система способна разрешать двойные сигналы от светодиода при временной задержке между ними менее 100 нс. Необходимо отметить, что реальные физические световые сигналы в жидком аргоне характеризуются большей длительностью сигнала<sup>1</sup>, что несколько

<sup>1</sup>При высокой чистоте аргона спад сигнала может достигать нескольких микросекунд.

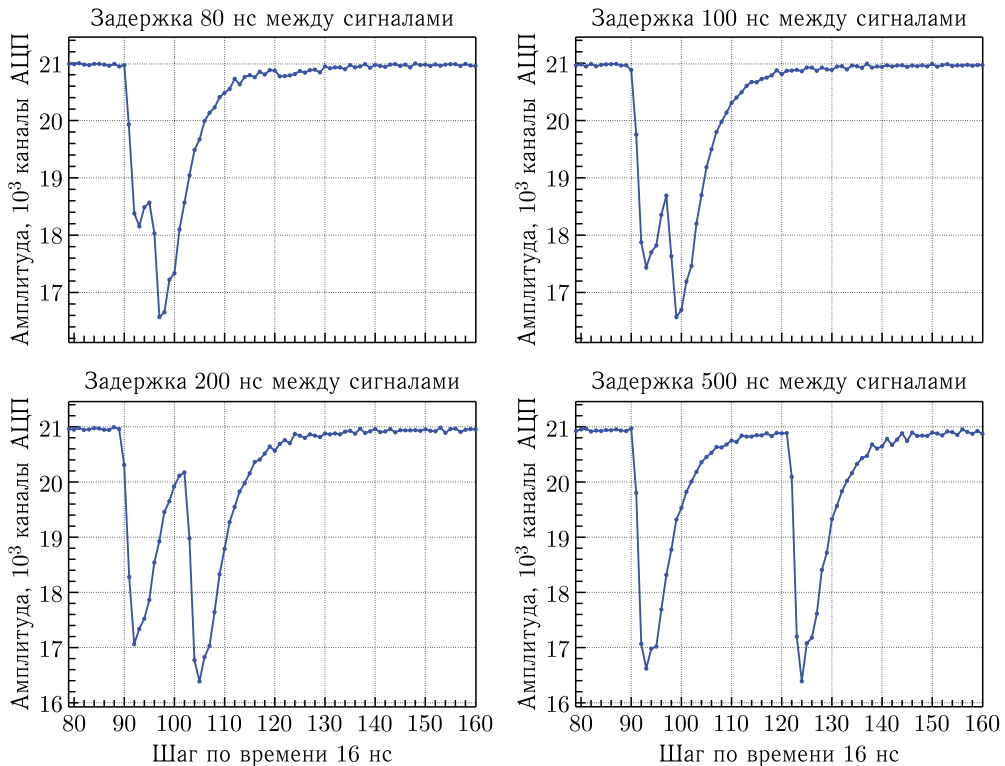


Рис. 6. Отклик светосчитывающей системы жидкоаргоновой ВПК на световые импульсы от системы калибровки с различным временем задержки между сигналами

уменьшает разрешающую способность разделения наложенных сигналов в световой системе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спроектирована и изготовлена система калибровки светосчитывающей системы для жидкоаргоновой ВПК. Предварительно проведены испытания прототипов модулей калибровки в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ при комнатной и криогенной температурах, где выявлена надежность работы модулей калибровки в условиях криогенных температур. Показано, что светодиод с длиной волны 265 нм может использоваться для долговременного изучения свойств слоя ТРВ, нанесенного на детекторы света. Необходимо отметить, что при криогенных температурах было обнаружено смещение рабочей точки светодиодов. Таким образом, для питания светодиодов в криогенных условиях требуется использование источника импульсов, обеспечивающего выходной сигнал с амплитудой более 5 В, и короткой длительности (менее 50 нс). В работе продемонстрирован усилитель импульсов на базе биполярного транзистора, который позволяет эффективно усиливать сигналы стандартного генератора импульсов до амплитуды в 50 В и длительностью несколько десятков наносекунд. Такой усилитель

может быть использован в системе калибровки света для питания светодиодов в финальной версии полноразмерной ВПК. В случае, если потребуется долговременная стабильность световой вспышки от светодиода при использовании представленного в работе усилителя, необходимо будет доработать конструкцию и провести дополнительные испытания.

Изготовленная система калибровки была испытана в криогенной лаборатории Университета Берна в тестах прототипа ВПК. По результатам испытаний был подтвержден заложенный в систему функционал. С использованием системы проводилась калибровка Si-ФЭУ светосчитывающей системы, также были изучены ее временные характеристики. Показано, что световая система способна разрешать двойные световые сигналы от светодиода системы калибровки при временной задержке между ними менее 100 нс, что указывает на возможность выполнения наложенного на светосчитывающую систему требования к разрешающей способности наложенных сигналов (менее 200 нс).

В целом данная система калибровки удовлетворяет всем предъявленным к ней требованиям и в будущем может быть модифицирована и использована в конструкции полноразмерной жидкоаргоновой ВПК.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Acciarri R. et al. (*DUNE Collab.*). Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE). Conceptual Design Rep. V.2: The Physics Program for DUNE at LBNF. arXiv:1512.06148.
2. Acciarri R. et al. (*DUNE Collab.*). Long-Baseline Neutrino Facility (LBNF) and Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE). Conceptual Design Rep. V.1: The LBNF and DUNE Projects. arXiv:1601.05471.
3. Hewes V. et al. (*DUNE Collab.*). Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) Near Detector Conceptual Design Report // *Instruments*. 2021. V. 5, No. 4. P. 31.
4. 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.
5. Auger M. et al. ArCLight — A Compact Dielectric Large-Area Photon Detector // *Instruments*. 2018. V. 2, No. 1. P. 3.
6. Kunzmann J. et al. (*DUNE Collab.*). Production and Testing of the Large-Area Photon Detector ArCLight // *J. Instrum.* 2023. V. 18, No. 06. P. C06008.

Получено 24 мая 2024 г.