

КАЛИБРОВКА ФЭУ ДЛЯ АДРОННОГО СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО КАЛОРИМЕТРА ATLAS, ГАММА-ОБСЕРВАТОРИИ TAIGA И КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА TUS

*В. М. Гребенюк^{а,б}, А. Пан^{а,в}, Я. Сагань^{а,б}, Л. Г. Ткачëв^{а,б},
А. Н. Шалюгин^{а,1}*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

^в Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

В рамках подготовки астрофизических экспериментов TAIGA и TUS с помощью специального стенда протестировано 1400 ФЭУ типа XP1911, 1020 ФЭУ типа XP1911/UV и 290 ФЭУ типа R1463 по их основным и дополнительным характеристикам, таким как номинальное (рабочее) напряжение, темновой ток, квантовая эффективность фотокаатода, резистивность катодной камеры и параметры качества диодной системы. Полученные результаты сравнивались с результатами испытаний 1250 новых ФЭУ типа R7877, проведенных ранее для эксперимента ATLAS на LHC (CERN, Женева). Количество ФЭУ, забракованных по критериям качества, составило: 3,9% для XP1911, 15,8% для XP1911/UV и 4,8% для R1463 от соответствующих количеств ФЭУ данного типа.

In the framework of the astrophysical experiments TAIGA and TUS, a special test bench was used to test 1400 XP1911, 1020 XP1911/UV and 290 R1463 PMTs by the basic and additional characteristics such as the nominal (operational) voltage, the dark current, the quantum efficiency of photocathode, resistivity of the cathode chamber and quality of dynode system. The obtained results were compared with the corresponding characteristics of 1250 new PMTs of type R7877 which were tested for the ATLAS experiment at the LHC (CERN, Geneva). The number of summarized rejects in the PMT groups was as follows: XP1911 – 3.9%, XP1911/UV – 15.8%, R1463 – 4.8%.

PACS: 29.30.-h; 29.40.Ka; 29.40.Vj

ВВЕДЕНИЕ

Для получения более точной информации об исследуемых физических процессах количество спектрометрических каналов в физике высоких энергий и астрофизике составляет несколько тысяч. Первостепенное значение имеют характеристики детектирующих элементов, в частности фотоумножителей (ФЭУ). Получение знаний о них

¹E-mail: ashalyugin@jinr.ru

требует прецизионных измерений ФЭУ на специальных стендах. Из-за жестких требований к надежности и для простоты эксплуатации необходимо массовое тестирование ФЭУ на этапе подготовки к созданию детектора.

В случае использования ФЭУ в составе детекторов существенное значение имеют следующие характеристики: коэффициент усиления, или рабочее напряжение при заданном усилении, темновой ток при максимально допустимом напряжении, максимальная квантовая эффективность. Обычно производитель ФЭУ приводит эти характеристики (вместе с другими) в индивидуальном паспорте изделия. Однако данных фирмы-изготовителя зачастую становится недостаточно при создании детекторов с повышенным уровнем надежности в течение длительного срока эксплуатации (десять лет). В этом случае создаются специальные стенды для поточного тестирования ФЭУ для более жесткого отбора изделий по дополнительным параметрам, чтобы обеспечивать необходимый уровень точности и надежности. Например, при создании адронного сцинтилляционного калориметра установки ATLAS на LHC (CERN, Женева) [1] проводилось тестирование около 10 000 «заводских» ФЭУ R7877 (Hamamatsu) по их основным характеристикам (усилению, темновому току, квантовой эффективности) и дополнительным параметрам, таким как резистивность катодной камеры и временная стабильность, для того чтобы обеспечить работоспособность детектора в течение 20 лет. Другой сферой применения подобных стендов является тестирование ранее использованных ФЭУ для отсева неисправных изделий, а также обновления значений их основных паспортных характеристик. Такая задача стояла при создании орбитального детектора TUC [2, 3] для изучения космических лучей предельно высоких энергий или при создании атмосферных черенковских телескопов для астрофизической гамма-обсерватории TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy, Бурятия) [4, 5]. В качестве элементов камеры атмосферных черенковских телескопов использованы ФЭУ XP1911 и XP1911/UV (Philips) 2003 г. и 1998 г. выпуска соответственно, проработавшие на установках ускорителя DESY (Гамбург) более 10 лет.

Главными задачами представляемой работы являются получение основных и дополнительных характеристик ранее использованных ФЭУ XP1911, XP1911/UV (оба Philips) и ФЭУ R1463 (Hamamatsu), сравнение их с соответствующими характеристиками новых ФЭУ R7877 (Hamamatsu) и отсев проблемных или потенциально проблемных изделий по четырем критериям, принятым для адронного сцинтилляционного калориметра установки ATLAS [1] лишь с одним видоизменением по номинальному напряжению, так как XP1911 более высоковольтный:

- 1) рабочее (номинальное) напряжение в диапазоне 1050–1150 В;
- 2) выход в насыщение вольт-амперной характеристики катодной камеры (зависимость тока катода от напряжения между катодом и первым динодом) до 30 В;
- 3) темновой анодный ток (I_{D1200}) при напряжении, близком к номинальному (т. е. при 1200 В), не более 2,0 нА;
- 4) отношение темновых анодных токов (I_{D1300}/I_{D1200}) не более 4.

Последние два критерия носят «мягкий» характер отбора, при котором ФЭУ с повышенным темновым анодным током (I_{D1200}) или отношением темновых анодных токов (I_{D1300}/I_{D1200}) будет устанавливаться в детекторе в менее значимой позиции.

Приведенные выше критерии диктуются астрофизической обсерваторией TAIGA [6, 7], которая предполагает использование общего резистивного делителя и

одного высоковольтного источника питания для группы из 7 ФЭУ. А это значит, что рабочее напряжение каждого ФЭУ из группы должно быть одинаковым в пределах погрешности измерений (примерно $\pm 2,0\%$).

В качестве подготовительных мероприятий для эксперимента TAIGA были проведены тестирования на стенде ранее использованных ФЭУ XR1911 и XR1911/UV [8] в количестве 1400 и 1020 шт. соответственно. Для сравнительного анализа использованы данные, полученные на этом же стенде при тестировании 1250 новых ФЭУ R7877 (Hamamatsu).

1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ СТЕНДА ТЕСТИРОВАНИЯ ФЭУ

В качестве основы специального стенда для тестирования ФЭУ использована установка, описанная в [10], с некоторой модернизацией под новый тип ФЭУ. Изменений коснулись конструкции черного ящика ФЭУ и подвижной матрицы к ним, схемы спецделителя и программного обеспечения, в котором лимит максимального напряжения питания увеличен с 1000 до 1500 В.

Общий вид тестового стенда представлен на рис. 1. В схеме стенда можно выделить 4 группы оборудования:

- персональный компьютер;
- черный ящик источников света с фильтрами;
- черный ящик матрицы ФЭУ;
- сервисная электроника.

Более подробно главные внутренние элементы ящика источников света с ослабляющими фильтрами показаны на рис. 2 (подвижные колеса с фильтрами) и рис. 3 (подвижный стол матрицы ФЭУ).

Черный ящик источников света предназначен для формирования стабильного калиброванного светового сигнала с его транспортировкой в ящик матрицы ФЭУ. В ящике находятся две подобные системы генерации света — постоянного и импульсного.

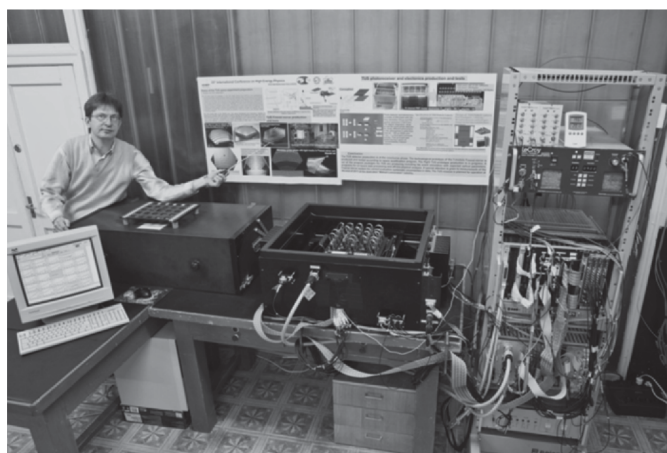


Рис. 1. Общий вид установки тестирования ФЭУ

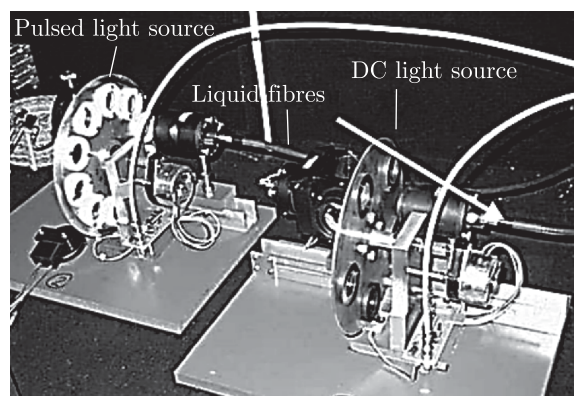


Рис. 2. Подвижные колеса с ослабляющими свет фильтрами

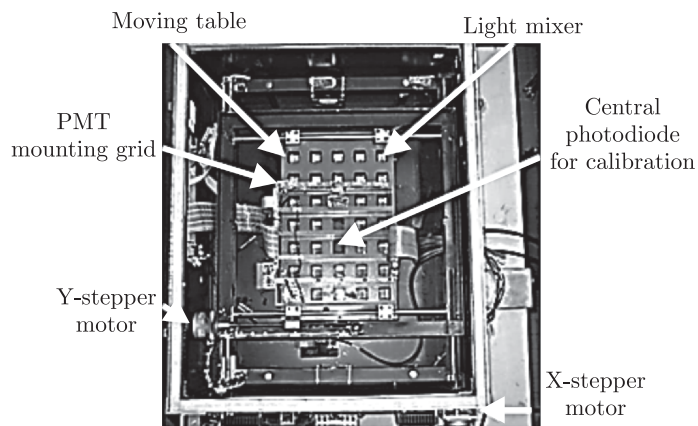


Рис. 3. Подвижный стол 5 × 5-матрицы ФЭУ

Каждая система состоит из излучающего светодиода, подвижного колеса с шаговым приводом, фильтров с фиксированными коэффициентами ослабления света и оптического разделителя для контроля работы источника света (так называемого монитора светодиода). Для тестирования ФЭУ XP1911, XP1911/UV и R1463 используется только одна система, которая производит постоянный свет. В качестве излучателя постоянного света используется светодиод BP280CWB1K-3.6VF-050T (Ledtronics, США) [11]. Спектр света, испускаемый светодиодом, корректируется интерференционным фильтром типа 480FS10-50 [12] (Andover, Япония), который вырезает узкую полосу спектра с максимумом длины волны 480 нм и шириной на полувысоте 10 нм. Затем проводится ослабление яркости светового сигнала с помощью фильтров. В позиционных окнах подвижного колеса находятся 3 фильтра с коэффициентом ослабления яркости 10/100/900. В дополнение к ним на этом колесе есть 2 окна (позиции), в которых находятся черная заглушка (для измерения пьедестала)

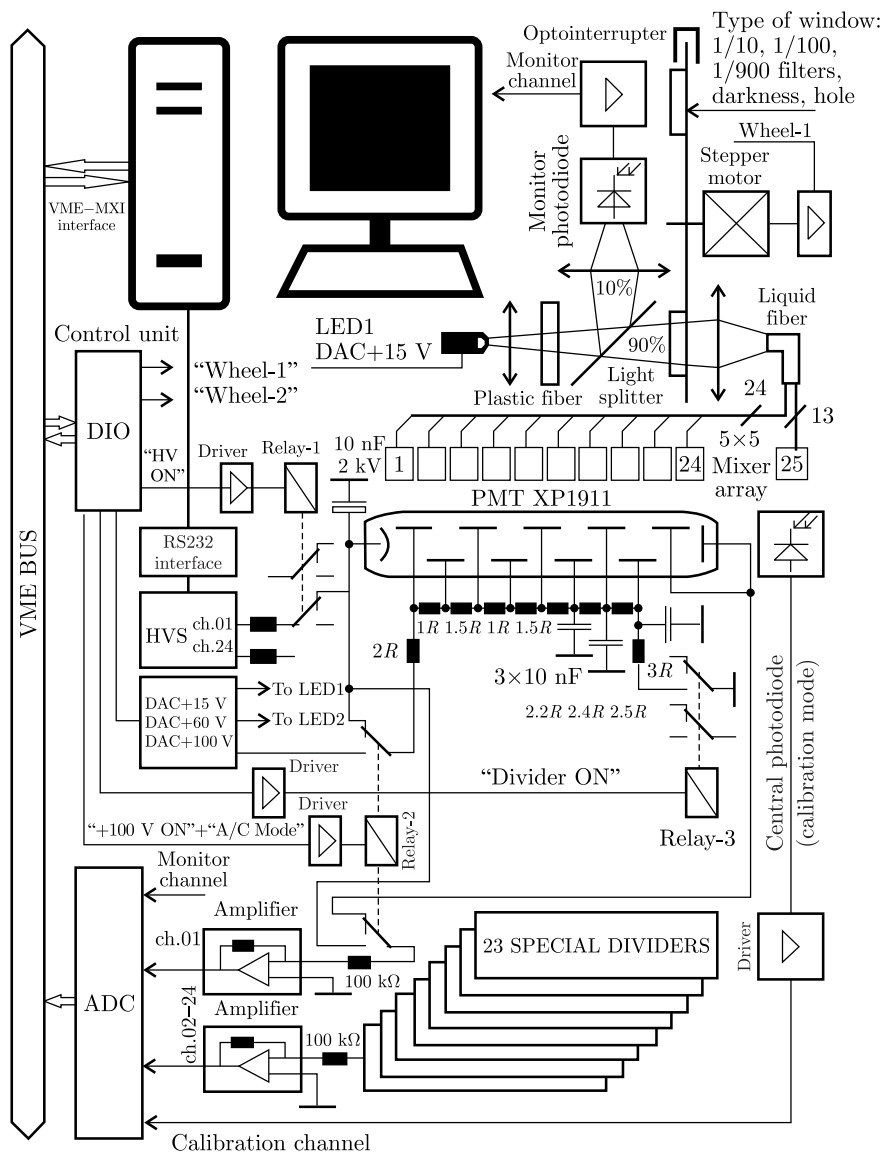


Рис. 4. Обобщенная схема стенда тестирования ФЭУ: VME-MXI Interface — система сопряжения внутренней шины компьютера с внешней аппаратной VME-шиной; LED1 — источник постоянного света (светодиод); DIO (Control Unit) — устройство ввода-вывода; Wheel-1, -2 — колеса позиционирования фильтров ослабления света; Driver — цифровой вентиль с повышенной нагрузочной способностью; Relay-1, -2, -3 — реле; Plastic fiber — световодное волокно из пластика; Liquid fiber — жидкостный световод; Light splitter — разделитель светового луча; Mixer array — световоды-смесители; Stepper motor — шаговый двигатель; Optointerrupter — оптический прерыватель; PMT — фотоумножитель; HVS — источник высокого напряжения; DAC — цифро-аналоговый преобразователь; ADC — аналого-цифровой преобразователь; Amplifier — усилитель постоянного тока; Special dividers — специальные резистивные делители с реле

и сквозное отверстие (для сравнения с мониторным сигналом). Позиционирование фильтров осуществляется компьютером с помощью шаговых двигателей. Подготовленный калиброванный сигнал проходит по коммуникационной системе, состоящей из более стойкого к изгибам жидкостного световода для внешнего соединения между ящиками и пластиковых волокон для распределения светового сигнала внутри ящика ФЭУ.

Черный ящик ФЭУ является светонепроницаемым, герметичным и терморегулируемым. В нем могут помещаться до 24 тестируемых ФЭУ. Они располагаются в матрице 5×5 вместе с индивидуальными световодами-смесителями. Внутри ящика к каждому световоду-смесителю подводится постоянный свет с помощью волокна из пластика диаметром 1,0 мм. Группа из 13 пластиковых волокон подводится к фотодиоду в центральной ячейке матрицы ФЭУ (канал 25). Таким образом, оптическое соединение толстого жидкостного световода и 37 пластиковых волокон позволяет доставить световой сигнал постоянного источника ко всем ячейкам матрицы ФЭУ. Аналогично происходит распределение светового сигнала для импульсного источника (в данной работе это не задействовано).

На рис. 4 более подробно представлена общая схема (оптика и электроника) стенда тестирования ФЭУ.

Матрица в ящике ФЭУ с помощью шаговых двигателей перемещается в X-, Y-направлениях вместе с центральным фотодиодом и устанавливается над каждым световодом-смесителем тестируемых ФЭУ. В этом случае осуществляется внутренняя калибровка 24 каналов ФЭУ и вводятся корректирующие коэффициенты, учитывающие изменение яркости света между каналами, вносимое закруглением, длиной и качеством полировки торца светопроводящих волокон (см. подробнее п. 2.3). Яркость светодиода регулируется цифро-аналоговым преобразователем в диапазоне 0–15 В с помощью управляющего кода, записываемого через шину VME в регистр ввода-вывода.

Процессом тестирования ФЭУ управляет персональный компьютер, который с помощью программного обеспечения проводит прием и передачу данных через интерфейсы VME-MXI и RS232, а также с помощью режимов оборудования, входящего в состав стенда.

Команды от компьютера через VME-магистраль поступают в регистр ввода-вывода, который инициирует управляющие сигналы для реле («Включение высокого напряжения», «Режим измерения тока анода/катода», «Включение +100 В», «Включение делителя») и выставляет коды для цифро-аналогового преобразователя с целью задания напряжения для светодиода (источника света). Кроме этого, через последовательный порт передается высоковольтное напряжение, общее для всех 24 каналов, в специализированный внутрикрейтный высоковольтный источник HV4032 (LeCroy, США) и считывается статус каждого канала питания ФЭУ.

Анодные или катодные токи подготовленной к тестированию партии ФЭУ из 24 шт. преобразуются в напряжение с помощью инструментального усилителя постоянного тока (классическая схема инвертирующего операционного усилителя). Затем это напряжение преобразуется в код с помощью прецизионного АЦП и записывается на жесткий диск компьютера в виде текстового файла.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЭУ

Измерения основных характеристик ФЭУ, таких как усиление, рабочее напряжение, темновой ток, квантовая эффективность (для длины волны света 480 нм), позволяют сделать вывод об их работоспособности и возможности использования в экспериментах TAIGA и TUC. Взятые из справочника основные технические характеристики ФЭУ XR1911, XR1911/UV (Philips) [8] и ФЭУ R1463 (Hamamatsu) [9] сведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1. Паспортные характеристики ФЭУ XR1911 и XR1911/UV (Philips)

Наименование	Значение
Количество диодов	10
Диаметр фотокатода	19 мм (3/4 дюйма)
Материал окна	Силикатное стекло
<i>Примечание.</i> Для XR1911/UV	Ультрафиолетовое стекло
Форма окна	Плосковогнутая
Тип фотокатода	Бищелочной (K ₂ CsSb)
Система диодов	Линейно-фокусирующая
Материал диодов	Сплав Cu-Be
Диапазон спектральной чувствительности фотокатода	290–650 нм
<i>Примечание.</i> Для XR1911/UV	190–650 нм
Максимальная спектральная чувствительность фотокатода	420 нм
Чувствительность фотокатода к синему свету (фильтр Coming CS No. 5–58)	11 мкА/лм (типовая)
Квантовая эффективность фотокатода при длине волны света 480 нм	20%
Темновой анодный ток при напряжении питания 1350 В на делителе типа «А»	2 нА (типовой) 10 нА (макс.)
Линейность (2%) анодного тока при напряжении питания 1500 В на делителе типа «А» (усиление $5,1 \cdot 10^6$)	20 мА

Таблица 2. Паспортные характеристики ФЭУ R1463 (Hamamatsu)

Наименование	Значение
Количество диодов	10
Диаметр фотокатода	13 мм (1/2 дюйма)
Материал окна	Ультрафиолетовое стекло
Форма окна	Плосковогнутая
Тип фотокатода	Бищелочной (K ₂ CsSb)
Система диодов	Линейно-фокусирующая
Диапазон спектральной чувствительности фотокатода	185–850 нм
Максимальная спектральная чувствительность фотокатода	420 нм
Чувствительность фотокатода (вольфрамовая лампа 2856 К)	120 мкА/лм (типовой)
Квантовая эффективность фотокатода при длине волны света 480 нм	20%
Темновой анодный ток при напряжении питания 1000 В на симметричном делителе	4 нА (типовой) 20 нА (макс.)

2.1. Рабочее напряжение питания. Для получения рабочего напряжения ФЭУ снимается кривая зависимости усиления от приложенного напряжения. Усиление измеряется для 9 значений в диапазоне 900–1300 В с шагом 50 В для ФЭУ XP1911 и для 7 значений в диапазоне 600–900 В с тем же шагом для ФЭУ R7877. Статистическая погрешность отдельных измерений составляет 1,4%. Полученные данные обрабатываются методом наименьших квадратов. В качестве подгоночной функции используется показательная функция вида

$$\mu = a(E)^b. \quad (1)$$

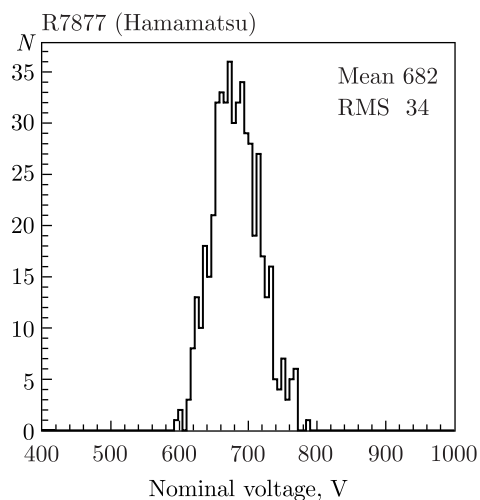


Рис. 5. Распределение рабочего напряжения для ФЭУ R7877

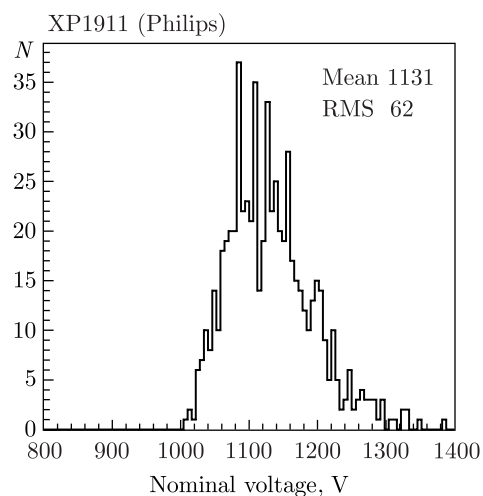


Рис. 6. Распределение рабочего напряжения для ФЭУ XP1911

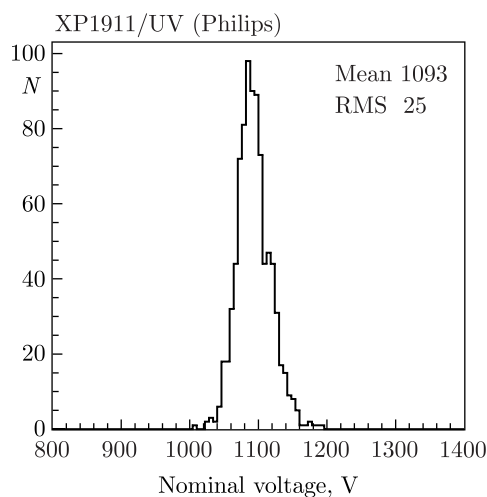


Рис. 7. Распределение рабочего напряжения для ФЭУ XP1911/UV

Результатом подгонки является получение значений параметров a и b , с помощью которых по формуле (1) вычисляется значение рабочего напряжения ФЭУ при усилении, равном $1 \cdot 10^5$.

Результаты определения рабочего напряжения, полученные для ФЭУ R7877, XP1911, XP1911/UV, представлены на рис. 5–7. Распределение рабочего напряжения для уже использованного ФЭУ XP1911/UV не уступает распределению для новых ФЭУ R7877. Узкая ширина распределения идеально подходит для применения их в астрофизической обсерватории TAIGA.

2.2. Качество диодной системы. В руководстве применения ФЭУ [13] показана взаимосвязь кривой усиления с эффективностью сбора электронов и качеством материала электродов.

Усиление диодной системы определяется вторичной эмиссией электронов. Величина вторичной эмиссии диода δ является функцией межэлектродного напряжения диодов U и определяется следующим выражением:

$$\delta = \varepsilon U^k. \quad (2)$$

Здесь ε — эффективность сбора электронов (отношение числа подающих электронов к числу испущенных предыдущим диодом, т. е. геометрический аксептанс диодной системы) и k — параметр, определяющий структуру материала электродов диодной системы (обычно $k = 0,7-0,9$).

Фотоэлектронный ток I_{cathode} , эмитируемый с фотокатода, достигает первого диода, от которого образуется ток вторичных электронов ($I_{\text{dynode 1}}$). В этом случае величина вторичной эмиссии δ_1 на первом диоде вычисляется следующим образом:

$$\delta_1 = \frac{I_{\text{dynode 1}}}{I_{\text{cathode}}}. \quad (3)$$

Электроны размножаются в каскадном процессе: 1-й диод \rightarrow 2-й диод $\rightarrow \dots \rightarrow n$ -й диод. Величина вторичной эмиссии δ_n n -го диода находится по формуле

$$\delta_n = \frac{I_{\text{dynode } n}}{I_{\text{dynode } (n-1)}}. \quad (4)$$

А выражения для анодного тока I_{anode} и усиления μ будут следующими:

$$I_{\text{anode}} = I_{\text{cathode}} \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n, \quad (5)$$

$$\mu \equiv I_{\text{anode}} / I_{\text{cathode}} = \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n. \quad (6)$$

В случае использования симметричного делителя ($1R-1R-1R-\dots-1R$), когда межэлектродное напряжение диодов U одинаково, формула усиления записывается так:

$$\mu = (\varepsilon U^k)^n = \varepsilon^n \frac{1}{(n+1)^{kn}} (E)^{kn}. \quad (7)$$

Здесь E — напряжение высоковольтного питания ФЭУ; n — количество диодов.

В гамма-телескопе эксперимента TAIGA используются ФЭУ с несимметричным делителем. На рис. 4 приведена схема такого делителя для ФЭУ XP1911

и XR1911/UV, у которых количество каскадов усиления $n = 8$ и распределение резисторов в межэлектродном промежутке следующее: $2R-1R-1,5R-1R-1,5R-2,2R-2,4R-2,5R-3R$ (суммарное сопротивление делителя $R_0 = 17,1R$, где $R = 500$ кОм). С использованием (2) и (6) формула усиления в случае несимметричного делителя для ФЭУ XR1911 принимает вид

$$\mu = \varepsilon \left(\frac{2R}{R_0} E \right)^k \varepsilon \left(\frac{1R}{R_0} E \right)^k \varepsilon \left(\frac{1,5R}{R_0} E \right)^k \varepsilon \left(\frac{1R}{R_0} E \right)^k \varepsilon \left(\frac{1,5R}{R_0} E \right)^k \varepsilon \left(\frac{2,2R}{R_0} E \right)^k \times \\ \times \varepsilon \left(\frac{2,4R}{R_0} E \right)^k \varepsilon \left(\frac{2,5R}{R_0} E \right)^k = \varepsilon^8 (59,4)^k \left(\frac{E}{17,1} \right)^{8k} = a(E)^b. \quad (8)$$

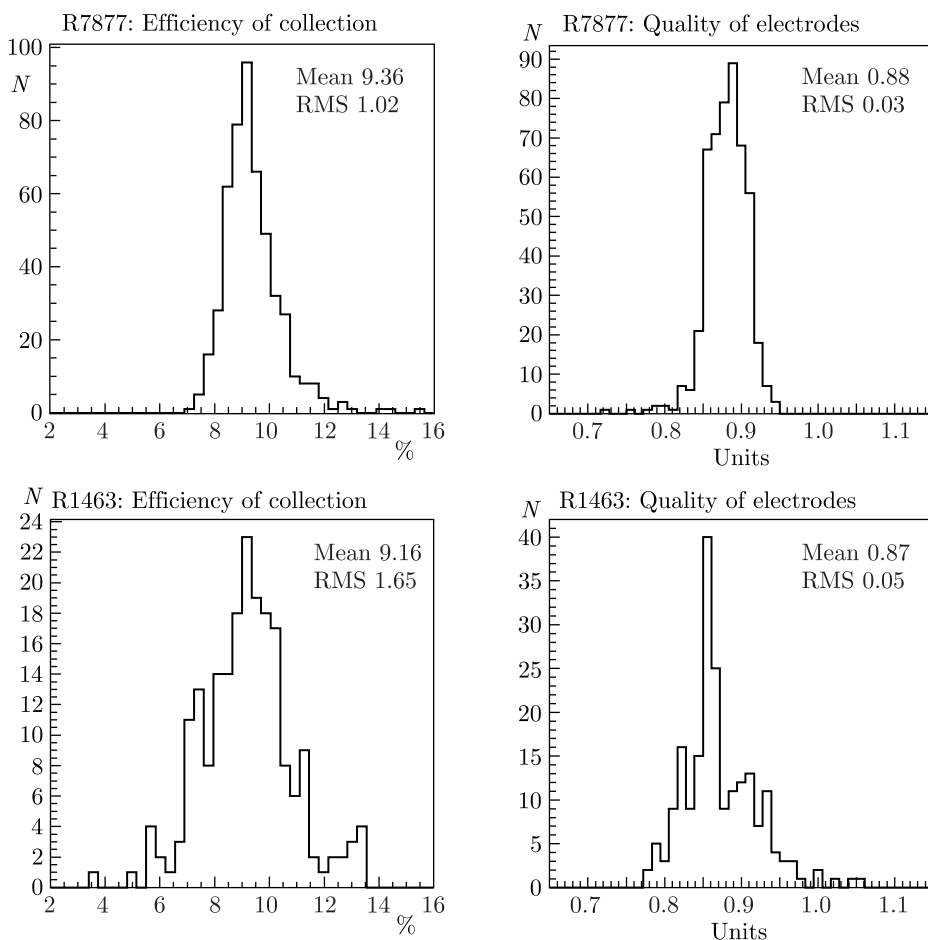


Рис. 8. Распределения параметров качества диодной системы ФЭУ R7877, R1463 (Нама-матсу): слева — эффективность сбора электронов ε ; справа — параметр качества материала электродов k

Тогда выражения для параметров диодной системы ФЭУ XP1911 можно представить через параметры a и b функции подгонки:

$$k = b/8, \tag{9}$$

$$\varepsilon = a^{1/8}(10,3)^k. \tag{10}$$

Распределения характеристик качества диодной системы ФЭУ XP1911, XP1911/UV приведены на рис. 8 (эффективность сбора электронов ε и параметр качества материала электродов k).

В случае использования ФЭУ R7877 в адронном сцинтилляционном калориметре установки ATLAS структура резистивного делителя не симметрична, но с другими весами [14]: $2R-2R-2R-1R-1R-1R-2R-3R-2R$ (суммарное сопротивление делителя $R_0 = 16R$, где $R = 169$ кОм). Поэтому выражение для эффективности сбора электро-

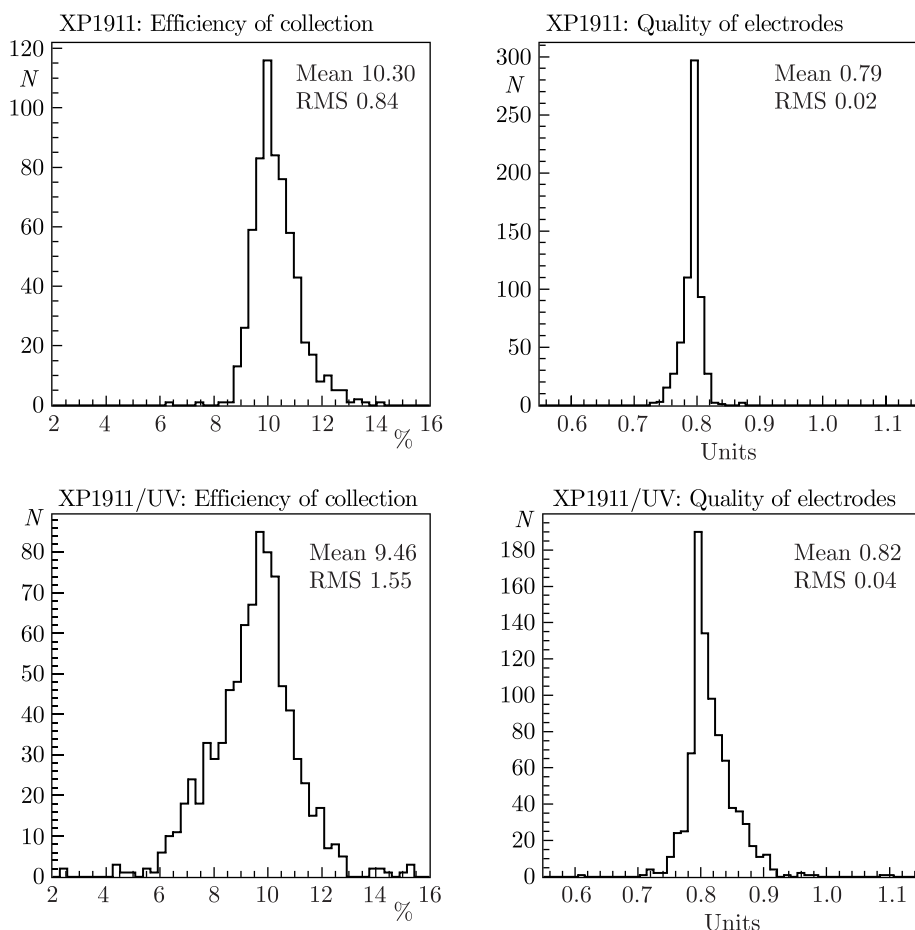


Рис. 9. Распределения параметров качества диодной системы ФЭУ XP1911, XP1911/UV (Philips): слева — эффективность сбора электронов ε ; справа — параметр качества материала электродов k

нов диодной системой ФЭУ R7877 принимает вид

$$\varepsilon = a^{1/8}(10,0)^k. \quad (11)$$

Распределения характеристик качества диодной системы ФЭУ R7877 и R1463 (у которого вычисление значения ε производится по формуле (7) при $n = 10$) представлены на рис. 9 (эффективность сбора электронов ε и параметр качества материала электродов k).

Эффективность сбора электронов всех типов ФЭУ примерно одинакова, несмотря на различный тип конфигурации их диодной системы (металлическая многоканальная система у ФЭУ R7877 и линейно-фокусирующая система у ФЭУ XP1911). Однако наблюдается различие качества материалов электродов у ФЭУ XP1911 и XP1911/UV (Philips) в среднем на 8% в сторону ухудшения по сравнению с ФЭУ R7877 (Hamamatsu). Этот эффект можно объяснить разницей в составе материалов, из которых сделаны электроды, и в технологии производства ФЭУ фирмами-изготовителями.

2.3. Квантовая эффективность фотокатодов. Квантовая эффективность ФЭУ является наиболее наглядной характеристикой фотоэмиссии катода. Она определяется как отношение количества электронов, которые испускаются фотокатодом, к количеству падающих на него фотонов [9]. Квантовая эффективность зависит от длины волны фотонов и материала фотокатода (точнее от работы выхода электронов из него). В каталогах фирм-производителей [8, 9] представлены типовые спектральные характеристики фотокатодов ФЭУ XP1911 («blue») и XP1911/UV («UV») фирмы Philips и фотокатода ФЭУ R7877 (спецвыпуск на основе модифицированного ФЭУ R5900) фирмы Hamamatsu. Из приведенных графиков на рис. 10 видно, что квантовая эффективность фотокатодов приблизительно 20% для всех трех типов ФЭУ при длине света 480 нм (установочное значение интерференционного фильтра постоянного источника света стенда).

Процедура измерений квантовой эффективности состоит в том, чтобы измерить ток, генерируемый ФЭУ, работающим в режиме измерения катодного тока («Cathode Mode»), и сравнить его с током, зарегистрированным фотодиодом типа S3204-04

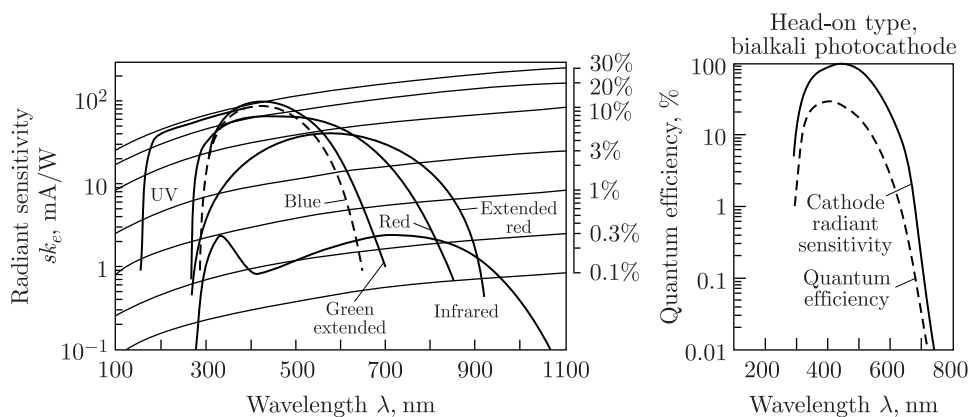


Рис. 10. Спектральные характеристики бищелочного фотокатода различных производителей: слева — Philips Photonics [8]; справа — Hamamatsu [9]

Hamamatsu (Япония) (рабочая площадь $18 \times 18 \text{ мм}^2$, квантовая эффективность 70% при 480 нм [15]), при одной и той же величине света. Чтобы учитывать разброс яркости светового сигнала, поступающего от единого постоянного источника света через индивидуальные светопроводящие волокна в каждую ячейку матрицы, проводится их калибровка. Она производится фотодиодом, который находится в центральной позиции подвижной матрицы. Процедура получения калибровочных коэффициентов C_i

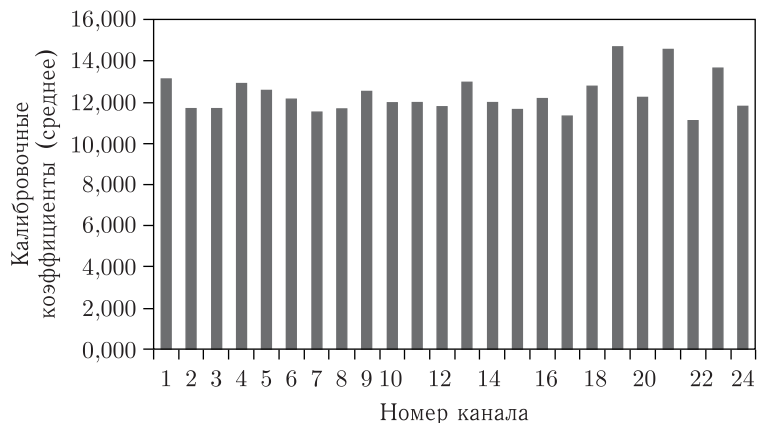


Рис. 11. Среднее значение калибровочных коэффициентов для всех 24 каналов

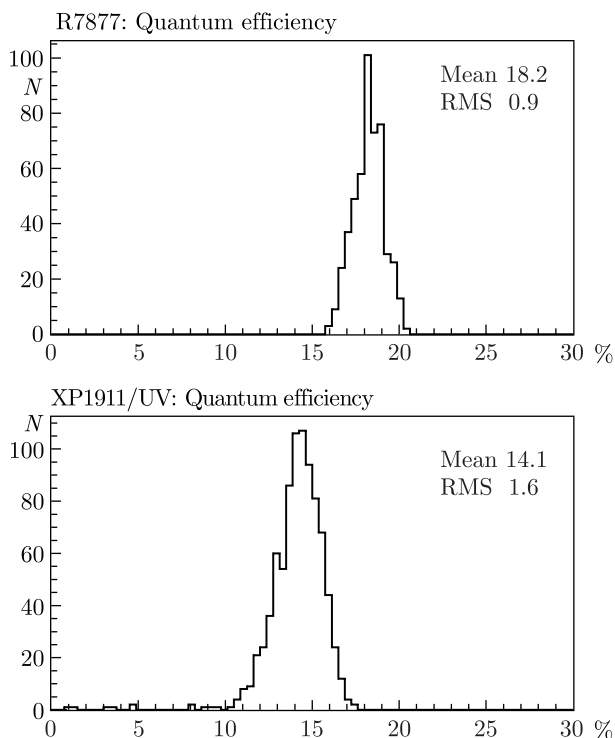


Рис. 12. Квантовая эффективность ФЭУ R7877 (вверху) и XP1911/UV (внизу)

осуществляется путем сканирования световых сигналов фотодиодом всех 24 ячеек матрицы. Результат калибровки представлен на рис. 11. Таким образом, с учетом калибровки квантовая эффективность для i -го ФЭУ вычисляется следующим образом [15]:

$$QE_{PMTi} = C_i QE_{PD} \left(\frac{I_{PMTi}}{I_{PD}} \right). \quad (12)$$

Здесь C_i — калибровочные коэффициенты; QE_{PD} — квантовая эффективность калибрующего фотодиода, а I_{PMTi} и I_{PD} — токи, измеренные в фотокатоде для i -го ФЭУ и в калибрующем фотодиоде соответственно.

С использованием выражения (12) полученные распределения квантовой эффективности фотокатодов двух типов ФЭУ представлены на рис. 12.

Сравнивая полученные квантовые эффективности бищелочных фотокатодов тестируемых ФЭУ с типовым значением $\sim 20\%$, взятым для длины волны света 480 нм, можно сделать вывод, что эта характеристика не изменилась у новых ФЭУ R7877 и уменьшилась в среднем на 30% у уже ранее использованных ФЭУ XR1911/UV. Такой эффект можно объяснить длительным сроком эксплуатации ФЭУ XR1911/UV в самых загруженных фотонами частях ранее действующих детекторов на ускорителе DESY.

2.4. Темновой анодный ток. Собственная шумовая характеристика ФЭУ формализуется через измерение темнового анодного тока при номинальном или максимальном рабочем напряжении питания. Этот параметр важен для любого детектора с точки зрения минимального сигнала, который можно зарегистрировать аппаратурой. Для анализа шума записывается файл измерений темнового анодного тока при напряжениях питания ФЭУ XR1911 и XR1911/UV 1200 и 1300 В. Величина 1200 В выбрана с расчетом, что она находится сразу за границей распределения номинального напряжения. Другая точка — 1300 В — предназначена для того, чтобы оценить, насколько близко находится начало экспоненциального роста шумового тока. В случае изме-

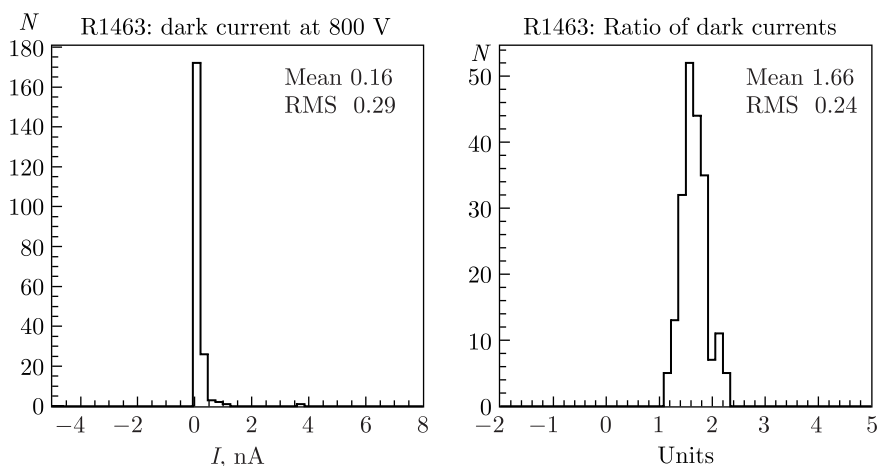


Рис. 13. Распределение темнового тока при напряжении питания 800 В для R1463. Соотношение темновых токов I_{D900}/I_{D800} для R1463 (справа)

рения темнового анодного тока ФЭУ R1463 используются данные при напряжениях питания 800 и 900 В. На стенде выполняется рекомендация производителей ФЭУ (в частности, Hamamatsu) по 30-минутной выдержке в темноте (напряжение питания ФЭУ 700 В) для рассасывания паразитного заряда перед измерениями темнового тока [13].

На рис. 13 представлены результаты измерений темнового анодного тока при 800 В и соотношение темновых анодных токов I_{D900}/I_{D800} для R1463. На рис. 14 приведены результаты измерений темнового анодного тока при 1200 В и соотношение темновых анодных токов I_{D1300}/I_{D1200} для XP1911 и XP1911/UV.

Распределение темнового анодного тока ФЭУ XP1911/UV при напряжении питания 1200 В близко к паспортным значениям свежеизготовленных образцов. Отношение темновых I_{D1300}/I_{D1200} токов указывает на то, что точка начала экспоненциального роста шумового тока не найдена и есть запас стабильности по шумовой характеристике как минимум 100 В.

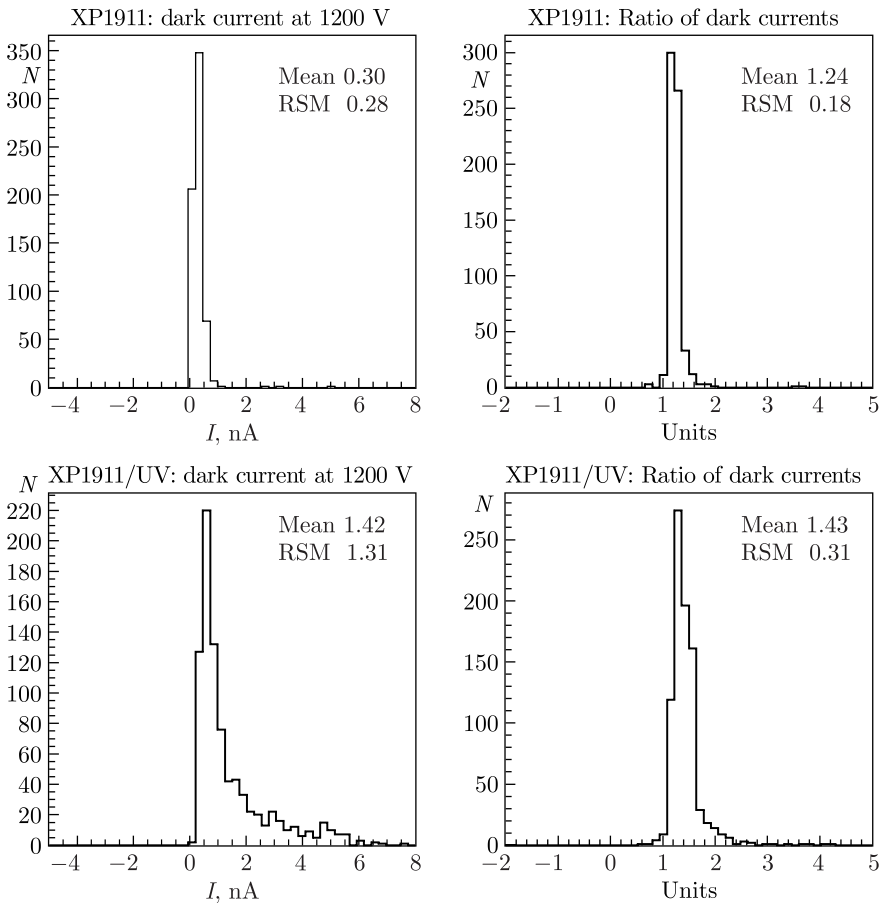


Рис. 14. Слева: распределение темнового тока при напряжении питания 1200 В для XP1911 и XP1911/UV. Справа: соотношение темновых токов I_{D1300}/I_{D1200} для XP1911

2.5. Вольт-амперная характеристика катодной камеры. Катодной камерой называется область между катодом и первым динодом. Катодная камера ФЭУ образуется поверхностями фотокатода и первого динода, а также расположенными между ними электродами, форма и распределение потенциалов на которых определяют ее электронно-оптические свойства, особенно в течение долгого периода эксплуатации ФЭУ [16].

Для получения вольт-амперной характеристики (ВАХ) катодной камеры цепь делителя после фотокатода разрывается, на первый динод подается положительное напряжение в диапазоне 0–100 В, и измеряется ток фотокатода с использованием инструментального операционного усилителя и прецизионного АЦП. При этом источник света имеет постоянную во время измерений яркость, которая соответствует фотокатодному току 10 нА.

В работах [15, 17] описаны результаты исследований ФЭУ R5900 (Hamamatsu) — «прародителя» ФЭУ R7877. На рис. 15, слева показана ВАХ катодной камеры 5 ФЭУ R5900 из статьи [15]. В публикации [17] сделан вывод, что образец BD09C7 не имеет выраженного плато насыщения фотокатодного тока из-за паразитной резистивности в промежутке между фотокатодом и динодами. Поэтому ФЭУ с похожей ВАХ не могут использоваться в детекторах долгосрочного действия.

На рис. 15, справа представлено распределение напряжения выхода на плато насыщения тока фотокатода для ФЭУ XP1911/UV. 843 ФЭУ из всего набора имеют крутую ВАХ катодной камеры, т. е. выход на плато насыщения происходит в районе 4–6 В, как и у всех новых ФЭУ R7877. Данные об этих ФЭУ не включены в результирующую гистограмму; использованы ФЭУ со значениями напряжения выхода на плато в диапазоне 7–33 В.

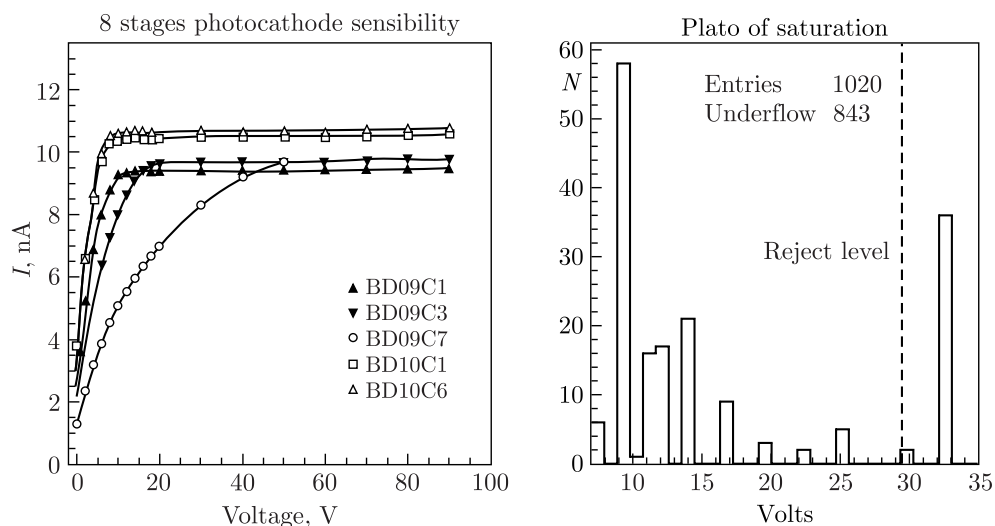


Рис. 15. Слева: вольт-амперная характеристика катодной камеры 5 ФЭУ R5900. BD09C7 — претендент на отсев, так как его фотокатодный ток не выходит на плато насыщения. Справа: распределение напряжения выхода в насыщение тока фотокатода ФЭУ XP1911/UV (уровень отсева — 30 В)

Критерий отбора ФЭУ в гамма-обсерватории TAIGA по напряжению выхода на плато насыщения тока фотокатода принят с учетом высокого рабочего напряжения питания и равен 30 В. Отсев ФЭУ XR1911/UV составляет $\sim 4\%$ от общего их количества.

2.6. Временная стабильность. Еще одной из дополнительных характеристик ФЭУ является его временная стабильность — дрейф сигнала во времени. Она определяется как отношение разности сигнала от постоянного света до и после паузы в работе источника света к их среднему значению, выраженное в процентах. Тест на определение временной стабильности состоит из 70 измерений постоянного света, величина которого соответствует уровню 3,0 мкА анодного тока. Измерения проводятся по следующей схеме: 30 измерений в течение 3 ч до выключения источника света, 30 измерений в течение 3 ч во время паузы (измеряется пьедестал) и 10 измерений в течение 1 ч после паузы в работе источника света.

В процессе испытания ФЭУ R7877 по такому параметру, как временная стабильность (рис. 16), 10 шт., или 0,8%, превышают критерий отбора (временная стабильность больше чем 2%). Дальнейшее их использование возможно в наименее значимых участках адронного сцинтилляционного калориметра установки ATLAS.

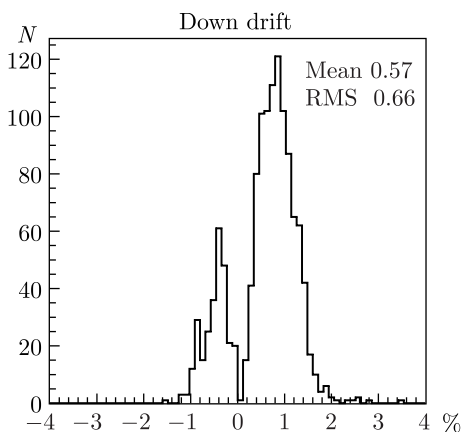


Рис. 16. Временная стабильность ФЭУ R7877

2.7. Систематические погрешности. В течение всего цикла тестирования однородных партий на стенде были использованы так называемые мониторные ФЭУ, которые занимали строго определенные позиции и участвовали во всех циклах измерений. При тестировании 1020 ФЭУ типа XR1911/UV в позициях каналов 1 и 2 находились мониторные ФЭУ № 017225 и № 021175 соответственно. В табл. 3 сведены систематические погрешности стенда по основным характеристикам, которые оценены по среднеквадратичным погрешностям измерений, проводимых у мониторных ФЭУ.

Таблица 3. Систематические погрешности измерений

Определяемый параметр	Среднеквадратичная погрешность	
	Абсолютная	Относительная
Номинальное напряжение	± 2 В	$\pm 0,1\%$
Квантовая эффективность	$\pm 0,5\%$	$\pm 3,6\%$
Эффективность сбора электронов диодами (a)	$\pm 0,2\%$	$\pm 1,7\%$
Качество материала электродов (k)	$\pm 0,004$	$\pm 0,5\%$
Темновой ток	$\pm 0,436$ нА	$\pm 25\%$
Отношение темновых токов	$\pm 0,107$	$\pm 7,6\%$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для тестирования ФЭУ типа XP1911, XP1911/UV (Philips) и ФЭУ типа R1463 (Hamamatsu) была проведена модернизация испытательного стенда, ранее созданного для эксперимента ATLAS, с точки зрения его адаптации к механическим и электрическим особенностям новых типов ФЭУ.

В рамках подготовки гамма-обсерватории TAIGA и орбитального эксперимента ТУС на спутнике «Михайло Ломоносов» было протестировано 1400 ФЭУ типа XP1911, 1020 ФЭУ типа XP1911/UV и 290 ФЭУ типа R1463 по их основным и дополнительным характеристикам, таким как номинальное (рабочее) напряжение, темновой ток при рабочем напряжении, квантовая эффективность фотокатода при длине волны света 480 нм, резистивность катодной камеры и параметры качества диодной системы. Количество ФЭУ, которое не удовлетворило критериям отбора: 3,9% для XP1911, 15,8% для XP1911/UV и 4,8% для R1463 от соответствующих количеств ФЭУ данного типа.

Проводилось сравнение характеристик 856 ФЭУ типа XP1911/UV, которые удовлетворяют критериям отбора и подготовлены к дальнейшему использованию в эксперименте TAIGA, с соответствующими характеристиками новых 1250 ФЭУ типа R7877 (Hamamatsu), полученными ранее для адронного сцинтилляционного калориметра установки ATLAS на LHC (CERN, Женева).

Показано, что квантовая эффективность фотокатода ранее использованных ФЭУ XP1911/UV уменьшилась в среднем на $\sim 30\%$ от первоначальных паспортных значений.

Авторы выражают благодарность студенту МГУ А. Никифорову и студентам университета «Дубна» А. Блинову, С. Жирнову, Н. Солонович за проведение огромного количества тестов ФЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ATLAS Collab.* ATLAS TDR Tile Calorimeter: Technical Design Report. CERN/LHCC/96-42 ATLAS TDR3. 1996.
2. *Abrashkin V. et al.* Updated TUS Space Fluorescence Detector for Study of UHECR // *Adv. Space Res.* 2008. No. 41. P. 2079–2088.
3. *Borejko V. et al.* The Selection of PMT for TUS Project // *Proc. of Nucl. Electronics Conf.* Sofia, 2011. P. 56–59.
4. *Budnev N. et al.* The TAIGA Experiment: From Cosmic Ray to Gamma-Ray Astronomy in the Tunka Valley // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. No. 718. P. 052006.
5. *Budnev N. et al.* The TAIGA Experiment: From Cosmic Ray to Gamma-Ray Astronomy in the Tunka Valley // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2017. V. 845. P. 330–333.
6. *Yashin I. et al. (TAIGA Collab.)*. Imaging Camera and Hardware of Tunka-IACT // *Proc. of 34th Intern. Cosmic Ray Conf.* Hague, 2015. PoS. V. 986.
7. *Postnikov E. et al.* Commissioning the Joint Operation of the Wide Angle Timing HiSCORE Cherenkov Array with the First IACT of the TAIGA Experiment // *Proc. of 35th Intern. Cosmic Ray Conf.* Busan, 2017. PoS. V. 756.
8. Philips Photonics, Photomultiplier Tubes. Catalog. 1997.
9. Hamamatsu, Photomultiplier Tubes. Catalog. 2010.

10. *Crouau M., Montarou G., Rey D.* Technical Characteristics of the Prototype of the TILECAL Photomultipliers Test-Bench. Internal Note ATL-TILECAL-99-148
11. 450 nm Ultra Bright Blue Led. Product Catalog.
<http://doc.chiplind.ru/ledtronics/bp280cwb1k36vf050t.htm>.
12. 400–499 nm Standard Bandpass Optical Filters. Product Catalog.
<https://www.andovercorp.com/products/bandpass-filters/standard/400-499nm>.
13. Hamamatsu Co. Photomultiplier Tubes: Basic and Application. Second ed. PMT Handbook. 1999.
14. *Vazeille F. et al.* Active Dividers for the Tile Calorimeter of the ATLAS Detector. ATLAS Internal Note ATL-COM-TILECAL-2013-014. 2013. P. 3.
15. *Crouau M. et al.* Characterization of the New 8-Stages Hamamatsu Photomultipliers for the July'98 Test Beam. ATLAS Internal Note ATL-TILECAL-98-166. 1998. P. 2–5.
16. *Заглубский А. А., Цыганенко Н. М., Чернова А. П.* Детекторы излучения // Учебное пособие СПбГУ. СПб., 2007. С. 17; <https://docplayer.ru/29600197-Detektory-izlucheniya-a-a-zagrubskiy-n-m-cyganenko-a-p-chernova.html>.
17. *Bouhemaïd N. et al.* Characterization of the Hamamatsu 10-Stages R5900 Photomultipliers at Clermont for the Tile-Calorimeter. ATLAS Internal Note ATL-TILECAL-97-108. 1997. P. 15.

Получено 5 апреля 2021 г.