

РАЗРАБОТКА И ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ИЗ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК В НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» – ИФВЭ

А. А. Борисов, А. Н. Исаев, А. С. Кожин, М. М. Солдатов,
Р. М. Фахрутдинов, А. П. Филин*

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логанова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Протвино, Россия

Приведены конструкция, процедура сборки и некоторые результаты испытания трековых камер на основе дрейфовых трубок в корпусе из алюминиевых труб диаметром 30 и 52 мм и майларовых труб диаметром 15 и 30 мм.

The design, assembly procedure and some test results of track chambers based on drift tubes housed in aluminum pipes 30 and 52 mm in diameter and mylar pipes 15 and 30 mm in diameter are presented.

PACS: 29.40.Gs; 29.40.Gx

ВВЕДЕНИЕ

Дрейфовые камеры — широко распространенный тип детектора для регистрации треков заряженных частиц. Они практически незаменимы при создании трековых систем с большой рабочей площадью. Координата трека в таких камерах определяется по времени дрейфа электронов, образующихся на следе ионизирующей частицы, до сигнальной проволоки дрейфовой трубки (ДТ). Конструкции камер и спектр используемых газовых смесей чрезвычайно широк [1].

Часто камеры, для повышения надежности, собирают из отдельных ДТ, в этом случае выход из строя отдельной трубки не выводит из строя всю камеру. В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ накоплен большой опыт [3–8] в разработке и создании таких камер, краткое изложение этого — в данной статье.

* E-mail: Anatoly.Kozhin@ihep.ru

КАМЕРЫ ИЗ 15- И 30-ММ ТРУБОК

Отдельная ДТ представляет собой классический пропорциональный счетчик (рис. 1, *a*): по оси цилиндрической трубки (1) натянута тонкая сигнальная (анодная) проволока (3), закрепленная в двух торцевых элементах (end-plugs, детали 2, 4–6). Торцевой элемент — важная часть конструкции ДТ, он должен точно фиксировать сигнальную проволоку, обеспечивать герметизацию внутреннего объема трубки и возможность прохода рабочей газовой смеси, изолировать сигнальную проволоку от корпуса при разности потенциалов до 3,5 кВ и передавать сигнал от проволоки до электронной аппаратуры.

Исторически мы начинали с ДТ в корпусе из тонкостенной (0,4 мм) алюминиевой (сплав AlMn1) трубы в рамках создания мюонного спектрометра установки ATLAS [2, 3] на БАК. Изолятор торцевого элемента изготовлялся методом горячего прессования из стеклонанполненного пластика (NORYL GFN3) с последующей механической обработкой алюминиевого корпуса ($\varnothing (30,010 \pm 0,05)$ мм). Уплотнение торцевого элемента осуществлялось при помощи резиновой кольцевой прокладки и обжатия трубы. При этом также обеспечивался электрический контакт между алюминиевым корпусом торцевого элемента и трубой благодаря вставленной между ними гофрированной пружине из нержавеющей стали. Точное позиционирование сигнальной проволоки осуществлялось при помощи пробитого лазерным лучом отверстия в латунной пластинке, диаметр отверстия ($0,055 \pm 0,005$) мм. Сигнальная проволока (W/Re = 97/3, Au, $\varnothing 0,050$ мм) натянута с усилием (350 ± 17) г с предварительным преднатяжением (1 минута) 450 г. Точность локализации проволоки относительно внешней поверхности торцевого элемента

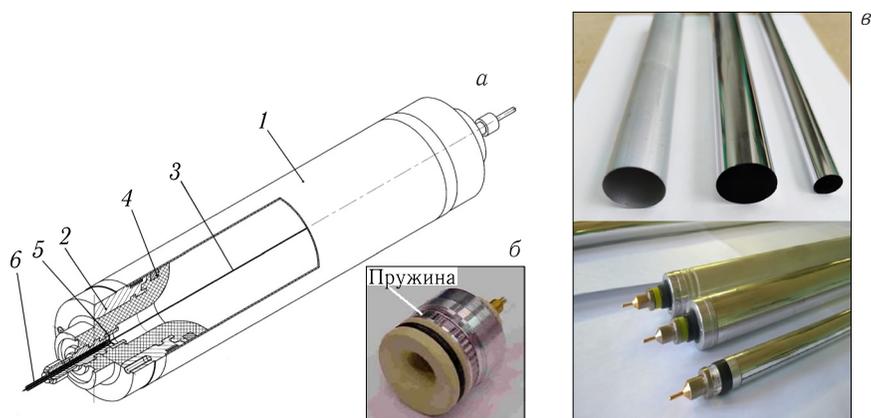


Рис. 1. Схема дрейфовой трубки (*a*), торцевой элемент (*б*), трубы и собранные дрейфовые трубки (*в*)

0,010 мм. Каждая изготовленная ДТ проверялась высоким напряжением и на герметичность, допустимая утечка менее $2 \cdot 10^{-8}$ бар·л/с при избыточном давлении аргона 3 бар. Длина алюминиевых трубок достигала 6,3 м без каких-либо промежуточных поддержек сигнальной проволоки.

Испытанные ДТ склеивались (Araldite AW106 + HV953) в трехслойные структуры (суперслои) с плотной упаковкой (рис. 2), расстояние между осями любых соседних трубок (d) равнялось 30,035 мм. Эта операция выполнялась последовательно, слой за слоем, на гранитном столе при помощи специальной оснастки (рис. 3, а) с оптоэлектронной системой мониторинга. При этом обеспечивалась высокая точность — в любом сечении камеры среднеквадратичное отклонение проволок от заданного не превышало 0,020 мм.

Для установки ATLAS дрейфовые камеры имели форму ступенчатой трапеции, состоящей из двух суперслоев, по три слоя трубок в каждом. Самая длинная камера (6,3 м) и гранитный стол с приспособлениями для позиционирования труб показаны на рис. 3, б. Всего было изготовлено 262 камеры, включающие 74 880 ДТ длиной от 1,2 до 6,3 м.

Для оснащения установок на ускорительном комплексе У-70 в Протвино и для оснащения установок по томографии на космических мюонах [9] по этой же технологии было изготовлено 28 камер, включающих около

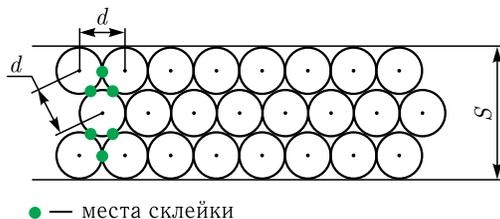


Рис. 2. Схема поперечного сечения камеры

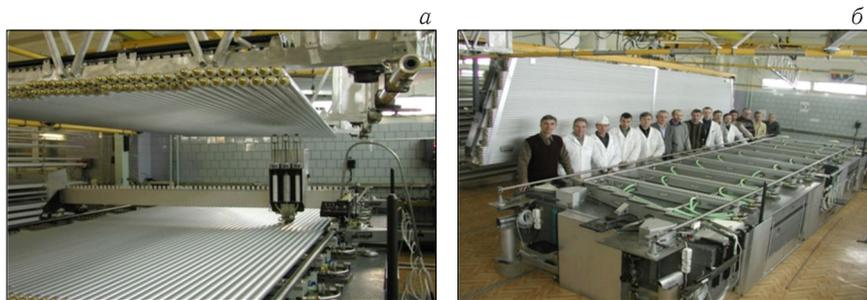


Рис. 3. Камеры из 30-мм трубок: а) склейка; б) камера длиной 6,3 м для ATLAS и гранитный стол

4000 ДТ длиной 1–3 м. Так как ДТ — самоподдерживающийся элемент, то, в отличие от многопроволочных камер, камеры из ДТ не требуют жестких массивных рам, которые должны выдерживать суммарное натяжение всех проволок. В данном случае задача рам — крепление камер в установке.

Для экспериментов на ускорительном комплексе У-70 потребовались трековые камеры, содержащие меньшее количество вещества по сравнению с камерами из алюминиевых ДТ. Поэтому было освоено производство труб из майларовой пленки толщиной 0,125 мм с двухсторонним напылением алюминия (см. рис. 1, *в*, верхняя часть). Трубы изготавливались при помощи ультразвуковой сварки из ленты, обернутой вокруг калиброванного стержня, шов продольный. Из таких труб диаметром 15 и 30 мм изготавливались камеры длиной от 0,5 до 2,5 м [4–7] (рис. 4), также по схеме плотной упаковки (см. рис. 2): для ДТ диаметром 30 мм $S = 82,02$ мм, $d = 30,035$ мм; для ДТ диаметром 15 мм $S = 41,82$ мм, $d = 15,5$ мм. ДТ диаметром 15 мм применяются при больших нагрузках и повышенных требованиях на быстродействие.

Отдельная майларовая ДТ — самостоятельный функциональный элемент, сохраняет форму без дополнительных растяжек, может выдерживать внутреннее давление до 1,5 атм. Торцевые элементы крепятся к майларовым трубам при помощи клея, одновременно герметизирующего внутренний объем ДТ. Испытания майларовых трубок аналогичны

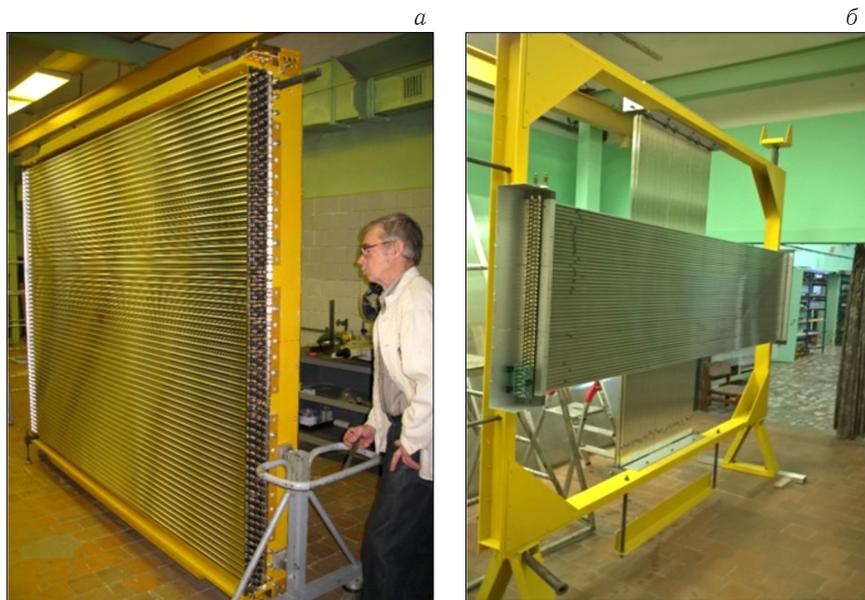


Рис. 4. Камеры из майларовых трубок длиной 2,5 м: а) $\varnothing 30$ мм; б) $\varnothing 15$ мм

испытаниям трубок с алюминиевым корпусом. Технология склейки камер из 30-мм майларовых трубок такая же, как и алюминиевых. Трубки диаметром 15 мм склеивались в специальной кассете, все три слоя одновременно. Некоторые камеры из майларовых трубок имеют омертвленные зоны площадью от 30×30 до 105×105 мм, омертвление части сигнальной проволоки достигается за счет одевания на нее медного капилляра нужной длины.

Всего изготовлено 35 камер, включающих 4992 майларовые трубки диаметром 30 мм и 11 камер из 1680 трубок диаметром 15 мм.

КАМЕРЫ ИЗ 52-ММ АЛЮМИНИЕВЫХ ТРУБОК

При умеренных требованиях на координатное разрешение и быстроедействие допустимо использовать ДТ большего диаметра. Для этих целей были разработаны ДТ в корпусе из алюминиевой трубы с внешним диаметром 52 мм и толщиной стенки 0,8 мм (рис. 5, а).

Сигнальная проволока ($W/Re = 97/3$, Au, $\varnothing 0,050$ мм) натянута с усилием (250 ± 11) г. Из таких трубок собирались двухслойные камеры, по 16 трубок в слое (рис. 5, б). Трубки длиной 3,7 м предназначены для годоскопа на космических мюонах [15], 24 камеры, 768 ДТ; из труб длиной 2,4 м изготовлен мюонный идентификатор $2,4 \times 2,4$ м, который будет использован в установке ОКА [16]. Идентификатор должен измерять треки мюонов (X - и Y -координаты) с точностью не хуже 1 мм, в месте прохождения пучка имеется окно площадью 200×200 мм (рис. 6).

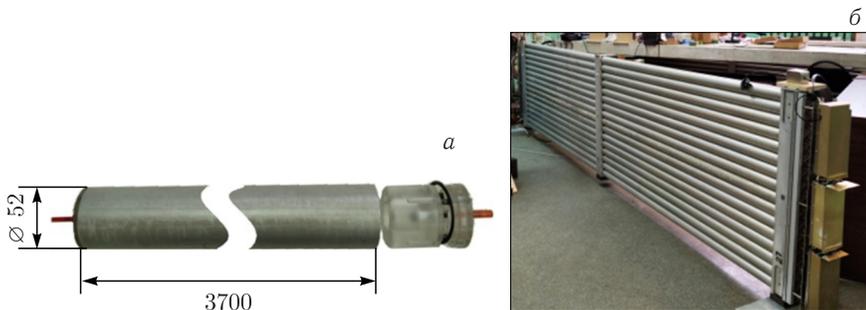


Рис. 5. а) Схема дрейфовой трубки $\varnothing 52$ мм; б) камера из таких трубок

РАБОТА ДРЕЙФОВЫХ КАМЕР БЕЗ ПОСТОЯННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Дрейфовые камеры могут использовать разнообразные газовые смеси, мы применяем только дешевую и безопасную смесь $Ag + 7\% CO_2$. Все камеры после изготовления проходили полную проверку, вплоть до



Рис. 6. Мюонный идентификатор для установки ОКА

реконструкции треков космических мюонов, с этой смесью. Высокая герметичность ДТ и вполне понимаемое желание экономии привели к режиму без постоянной циркуляции рабочей газовой смеси: однажды заполненные камеры работали до тех пор, пока сохраняли работоспособность. Такой режим использовался при всех проверках камер, а также в мюонных томографах.

Камеры из 30-мм алюминиевых трубок в прототипе мюонного томографа работали без замены газовой смеси 9 лет, камеры из майларовых трубок — от 1 мес до 1,5 лет, в зависимости от длины [10, 11]. На рис. 7 показаны счетные характеристики (зависимость скорости счета всех 144 трубок от напряжения, plateau curve) для камеры из 30-мм майларовых трубок длиной 1536 мм, время после заполнения: 0,1, 75, 467, 554 сут (на 7, а, б, в, г соответственно). При таком режиме существенно применение автокалибровки [12], так как $r(t)$ -соотношение меняется со временем. Периодичность выполнения автокалибровки зависит от конкретных условий.

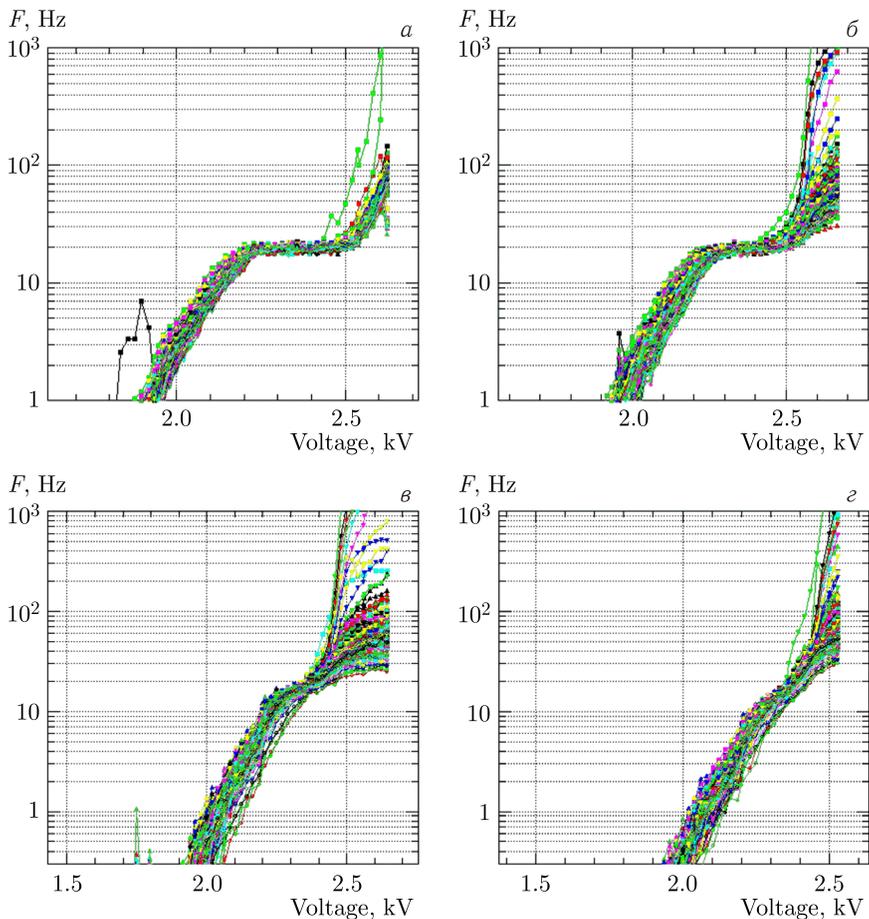


Рис. 7. Счетные характеристики камеры из майларовых трубок в разное время после заполнения газовой смесью

РЕГИСТРАЦИЯ СИГНАЛОВ, БЕСТРИГГЕРНАЯ И НАКАМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Во всех камерах съем сигнала и подача высокого напряжения производятся с разных сторон ДТ (рис. 8, *а*), пассивные элементы (резисторы и конденсаторы) монтируются на отдельных платах, каждая обслуживает 24 трубки. Для работы в мюонном томографе разработана специальная электроника, работающая в так называемом бестриггерном режиме, нет специализированных триггерных счетчиков. Реконструкция треков только по информации с трубок, трек (рис. 8, *б*) — общая касательная к радиусам, соответствующим времени дрейфа и преобразованию $r(t)$.

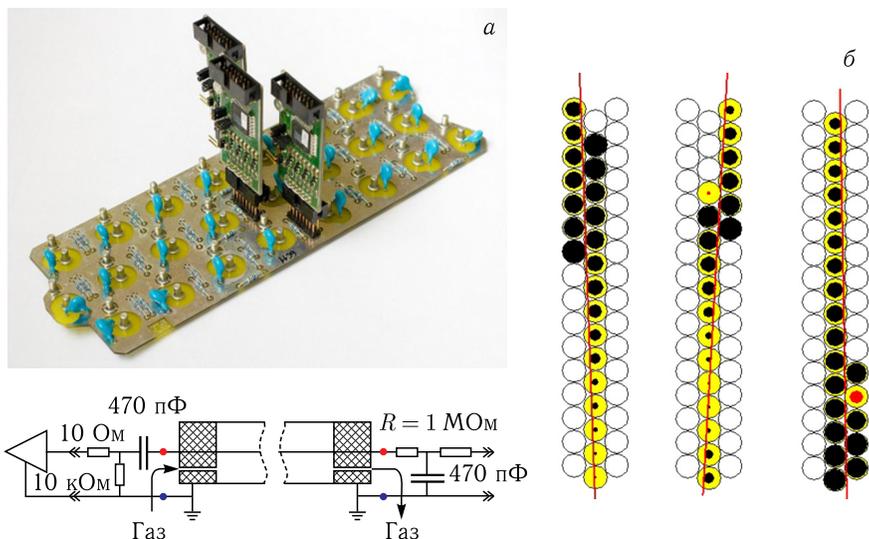


Рис. 8. а) Схема электрического включения отдельной трубки и плата с пассивными элементами; б) реконструкция треков космических мюонов в камере из ДТ

Для определения $r(t)$ -соотношения используется адаптированная для бестриггерного режима процедура автокалибровки [12]. Электронная аппаратура, помимо усилителей, включает времяцифровые преобразователи (ВЦП) и устройство передачи данных в ЭВМ. Эта аппаратура существует в двух версиях: в виде крейта [13] с набором отдельных модулей и «накамерный» [14] вариант.

Очевидное неудобство при расположении электронной аппаратуры в отдельном крейте — большое количество кабелей. На основе ПЛИС (FPGA) было разработано два варианта «накамерной» электроники, расположенной непосредственно на или вблизи камер с последующей передачей данных в ЭВМ. Первый (МТ48) рассчитан на трехслойные камеры из 30-мм трубок с числом трубок в слое, кратном 16 [14], и использовался для мюонного томографа [9].

Недостаток варианта накамерной электроники с МТ48 — возможность работы только с определенным типом камер. Для более широкого применения спроектирован другой вариант — НАК96 [15].

На 12 разъемов платы (рис. 9, а) размером 300×120 мм поступает до 96 сигналов от усилителей детектора в уровнях LVDS. Обработка поступивших сигналов производится в аппаратном процессоре, реализованном в FPGA ALTERA типа EP3C16(25)Q240C8. Временное разрешение ВЦП 2,5 нс. Объем внутренней памяти 4 Мбайта. Для передачи (вычитывания) данных в ЭВМ используется протокол USB 2.0 High Speed, время около 2 с. Изготовленные опытные образцы плат НАК96 испытаны на

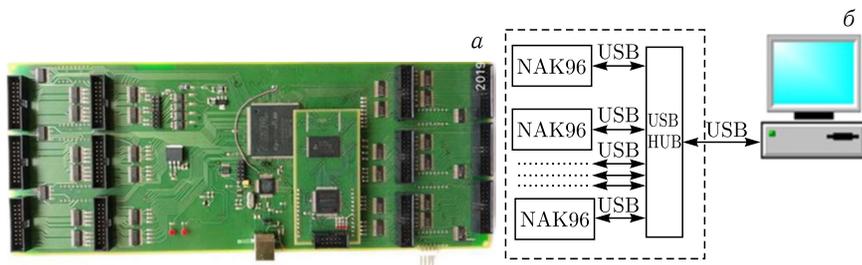


Рис. 9. NAK96: плата (а) и схема сбора данных (б)

дрейфовой камере из 52-мм трубок. Характеристики камер, измеренные с накамерной электроникой, совпадают с результатами, полученными с системой регистрации, размещенной в отдельном крейте [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ накоплен большой опыт разработки, изготовления, тестирования и применения трековых камер на основе ДТ. Было изготовлено:

- 290 камер, включающих около 79 тысяч 30-мм ДТ в тонкостенном алюминиевом корпусе длиной 1,0–6,3 м;
- 35 камер, включающих 4992 30-мм ДТ в корпусе из майларовой пленки толщиной 125 мкм, длина 1,0–2,5 м;
- 11 камер, включающих 1680 15-мм ДТ в корпусе из майларовой пленки толщиной 125 мкм, длина 0,5–2,5 м.

В стадии изготовления находятся 30 камер из алюминиевых трубок диаметром 52 мм.

Освоены режим работы дрейфовых камер без постоянной циркуляции рабочей газовой смеси и применение регистрирующей электроники в бестриггерном режиме как в удаленном крейте, так и в накамерном варианте.

Изготовленные камеры успешно эксплуатируются в установке ATLAS на БАК, в экспериментальных установках на ускорительном комплексе У-70 в Протвино и в экспериментальных установках по томографии на космических мюонах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Blum W., Riegler W., Rolandi L.* Particles Detection with Drift Chambers. Springer-Verlag, 2008.
2. *ATLAS Collab.* Muon Spectrometer. Technical Design Report CERN/LHCC/92-22. 1997.
3. *Borisov A. et al.* ATLAS Monitored Drift Tube Assembly and Test at IHEP (Protvino) // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 494. P. 214–217.

4. *Борисов А. А. и др.* Прецизионная дрейфовая трубка в корпусе из лавсана // ПТЭ. 2013. №2. С. 15–21.
5. *Божко Н. И. и др.* Камера из прецизионных дрейфовых трубок в лавсановом корпусе // ПТЭ. 2014. №4. С. 410–416.
6. *Borisov A. A. et al.* Track Chamber Based on Precision Drift Tubes Housed inside 30-mm Mylar Pipe // J. Instrum. 2014. V. 9. C06010.
7. *Vozhko N. I. et al.* Tracking Chamber Made of Mylar Drift Tubes for Experiments at the Accelerator Complex of the National Research Center “Kurchatov Institute” – ИЯЭ // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81, Iss. 9. P. 1312–1317.
8. *Божко Н. И. и др.* Дрейфовые камеры из лавсановых трубок диаметром 15 мм и длиной до 2,5 м // Ядер. физика и инжиниринг. 2019. Т. 10, № 1. С. 49–55.
9. *Борисов А. А. и др.* Установка «Мюонный томограф» с площадью перекрытия 3×3 квадратных метра // ПТЭ. 2012. № 2. С. 5–14.
10. *Божко Н. И. и др.* Опыт работы с дрейфовыми камерами без постоянного обновления рабочей газовой смеси. Препринт ИФВЭ 2019-14. Протвино, 2019.
11. *Borisov A. A. et al.* Cosmic-Ray Muon Tomography Setup: Long-Term Life of Drift Tube Chambers // Phys. At. Nucl. 2020. V. 83. P. 258–261.
12. *Vacci C. et al.* Autocalibration of High Precision Drift Tubes // Nucl. Phys. B. 1997. V. 54. P. 311–315.
13. *Боголюбский М. Ю. и др.* Система сбора данных и управления в стандарте электроники МИСС для детектора на дрейфовых трубках // ПТЭ. 2013. № 2. С. 39–48.
14. *Божко Н. И. и др.* Система камерной электроники на основе модуля МТ-48 для бестриггерного режима работы томографа на космических мюонах // ПТЭ. 2016. № 6. С. 20–27.
15. *Barinov M. E. et al.* Development of 10 sq. m Hodoscope Made of Drift Tubes for Cosmic Ray Muon Registration // Phys. At. Nucl. 2024. V. 87, No. 2.
16. *Obraztsov V. F.* Recent Results from OKA Setup at U-70 Synchrotron // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1526, No. 1. P. 012017.