

## КООРДИНАТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ ТОНКОСТЕННЫХ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК

*В. Д. Пешехонов\**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	167
ПАРАМЕТРЫ СТРОУ	168
Конструкция	168
Собственные характеристики	171
ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ	172
Ионизация газов, газовое усиление	172
Принцип действия	173
Режимы работы	178
Газовые смеси	180
Влияние параметров окружающей среды	185
Строу-трекеры ускорительных установок	185
ПАРАМЕТРЫ КООРДИНАТНЫХ СТРОУ-ДЕТЕКТОРОВ	187
Загрузочные способности	187
Гранулированные строу	190
Пространственное разрешение	192
Катодное считывание	196
Продольное считывание	199
СТРОУ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО ГАЗОВОГО НАПОЛНЕНИЯ	202
Механические характеристики	202
Газовые потери	205
Сравнительные параметры в рабочем диапазоне давления	206
Пространственное разрешение	207
Переходной режим с высоким пространственным разрешением	209

---

\*E-mail: pvd@sunse.jinr.ru

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	211
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	212

## КООРДИНАТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ ТОНКОСТЕННЫХ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК

*В. Д. Пешехонов\**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассматриваются конструктивные особенности и основные параметры трековых детекторов на основе строу на примерах выполненных исследований и разработок треков в ряде действующих и планируемых ускорительных экспериментальных установок. Приводятся результаты методических исследований, направленных на качественное улучшение пространственно-временных и загрузочных характеристик детекторов, повышающих возможности использования детекторов этого типа для регистрации частиц в условиях высокой множественности, в том числе в установках для экспериментов в условиях высокой светимости.

The design features and basic parameters of the coordinate detectors based on the existing straw trackers and some developed new setups are considered. The results of methodological studies aimed at improving the quality of space-time and load characteristics of the detectors, increasing the possibility of using this type of detectors for particle detection in high multiplicity, including facilities for high luminosity experiments, are presented.

PACS: 07.07.Df

### ВВЕДЕНИЕ

Исследования и разработки газовых многопроволочных пропорциональных камер (МПК, MWPC) [1], отмеченные Нобелевской премией 1992 г. Ж. Шарпаку, и затем дрейфовых камер (ДК, DC) [2] привели к появлению ряда новых модификаций газовых координатных детекторов, таких как времяпроекционные детекторы (ВПК, TPC) [3–5], и детекторов с регистрирующими элементами субмиллиметрового размера (микроструктурные детекторы, Micro-Pattern Gaseous Detectors (MPGD)), интенсивно развиваемых в настоящее время в рамках R&D 51 (ЦЕРН) [6]. Основные направления в развитии микроструктурных детекторов — координатные детекторы на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ, GEM) [7, 8] и так называемые micromegas

---

\*E-mail: pvd@sunse.jinr.ru

(ММ) [9]. Интерес к этим детекторам определяется их способностью работы в условиях экстремально высоких потоков заряженных частиц, достаточно хорошей радиационной стойкостью и пространственным разрешением около 100 мкм.

Если полупроводниковые кремниевые (силиконовые) детекторы с пэд-вым или стриповым считыванием информации могут использоваться в качестве «вершинных» детекторов, т. е. являются эффективно определяющими точки траектории заряженных частиц «трекерами» первой линии вблизи фиксированной мишени экспериментальной установки или вблизи точек столкновения пучковых частиц для коллайдерных установок, то MPGD (главным образом на основе ГЭУ) являются трекерами второй линии. Однако существует потребность в наличии удаленных трекеров (трекеров третьей линии), часто с достаточно большим акцептансом. В этом качестве могут применяться ДК с анодным и/или катодным считыванием, а также координатные детекторы на основе металлических дрейфовых трубок [10]. В последние годы все чаще для этих целей рассматриваются детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок, которые имеют лучшие параметры, при их разработке и создании используются более гибкие конструкторские решения, а стоимость единицы чувствительной площади невысока. В качестве примеров можно рассматривать строу-трекеры спектрометра COMPASS [11, 12], детектор переходного излучения — трекер внутреннего детектора ATLAS (LHC) [13–15], трекер LHCb [16, 17], а также трекеры создаваемых установок в рамках проектов PANDA (FAIR, Дармштадт) [18–20] и MECO/Mu2e (BNL) [21, 22].

## 1. ПАРАМЕТРЫ СТРОУ

**1.1. Конструкция.** Собранная тонкостенная дрейфовая трубка (строу) состоит из прецизионной пластиковой трубки, внутренняя поверхность которой является проводящей и служит катодом, с установленной по ее оси анодной проволокой, концы которой закреплены. Для фиксации анодов часто используют капиллярные металлические трубки [23], установленные в пластиковых концевых втулках. Собранная трубка схематично показана на рис. 1 [24]. Для уменьшения гравитационного и электростатического смещения анода в длинных строу от их оси устанавливаются поддерживающие анод втулки (спейсеры) по одной на каждые 80–100 см длины анода. Конструкция спейсеров может быть различной; для примера на рис. 1 показан спейсер строу трекера COMPASS, имеющий минимальные размеры по его длине и количеству собственного вещества: 15 и 25 мг для строу диаметром 6 и  $\sim 10$  мм соответственно. Для баррельной части внутреннего детектора TRT ATLAS использовались разработанные для трекера SSC SDC спейсеры (twisters) длиной  $\sim 1$  см, изготовленные из материала Ultem (polyetherimide),

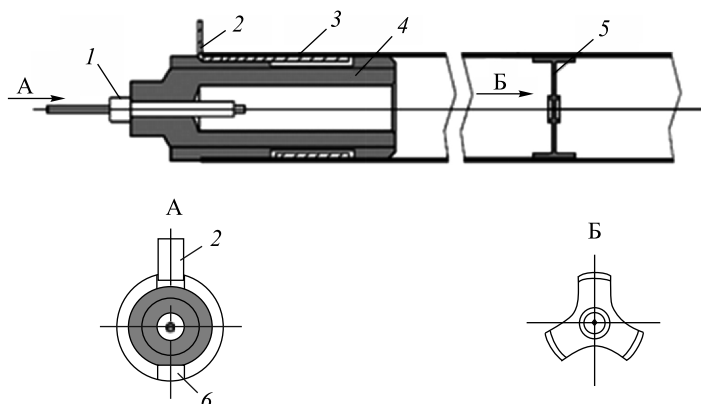


Рис. 1. Схема строу (3) со вставленными элементами: 4 — концевая втулка; 5 — спейсер; 1 — обжимной пин для закрепления анодной проволоки; 2 — кольцевая пружина для заземления катода строу; 6 — газовый канал. А — вид сверху на концевую втулку; Б — вид сверху на спейсер

обладающего, как полиимид и РЕЕК (PolyEtherEtherKeytone), хорошей радиационной стойкостью, а кроме того, термоадгезией при невысокой температуре. После установки в строу при продуве горячим воздухом они могут быть зафиксированы в заданной позиции. Длина таких спейсеров для строу диаметром 4 мм была 7,7 мм [25].

Точность всех элементов и технологических процедур сборки строу должна обеспечивать высокую соосность трубки с анодом по всей длине и точность позиционирования анодов не хуже 100 мкм. Требования к используемым в строу материалам: высокая радиационная стойкость, отсутствие отгаживания и нежелательных примесей. Выполненные исследования ряда материалов показали хорошие свойства поликарбоната, широко используемого для изготовления прецизионных пластиковых элементов [26, 27].

Изготовленные тонкостенные пластиковые трубки по их механическим характеристикам можно разделить на два типа: асимметричные и симметричные. Асимметричная трубка изготавливается ультразвуковой сваркой из металлизированной майларовой ленты требуемой ширины, при этом в месте сварки металлизация возгоняется и трубка имеет продольный непроводящий шов шириной 0,5–1 мм. На рис. 2 показан общий вид симметричной трубки, изготовленной намоткой из двух каптоновых стрипов, сдвинутых между собой на половину их ширины, а также сечения стенки строу [12]. Стрипы внутреннего слоя стенки трубок имеют проводящее покрытие на их внутренней поверхности и слой термоклей на наружной, стрипы внешнего слоя металлизированы и покрыты термоклеем на их внутренней поверхности. Намотка трубок проводится на калиброванном стержне, при этом одновременно осу-

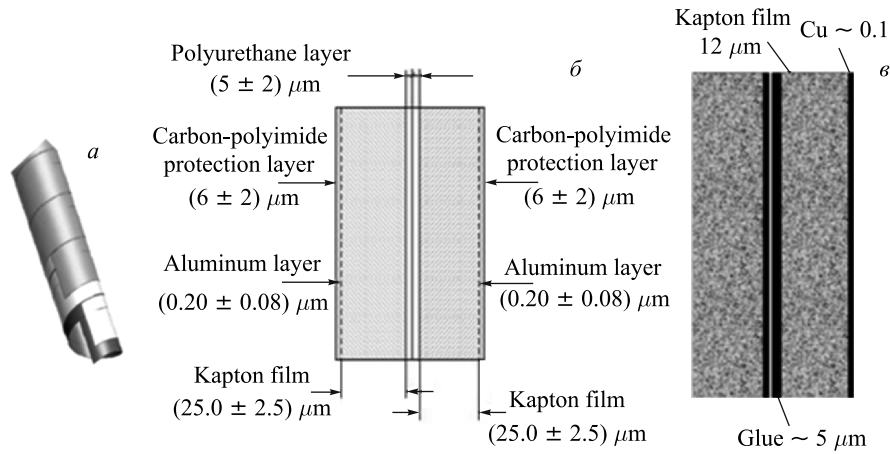


Рис. 2. *a)* Общий вид симметричной трубки, намотанной из двух каптоновых стрипов. Пленка внутреннего слоя — «loaded» каптон толщиной 40 мкм типа 160 XC 370 фирмы «Дюпон» (США), пленка наружного слоя — каптон толщиной 12 мкм со слоем алюминия 500 Å (строу COMPASS). *б)* Поперечное сечение стенки строу ATLAS TRT. *в)* Возможное поперечное сечение стенки строу толщиной менее 30 мкм. Пленки толщиной ~ 12 мкм и, возможно, ~ 7 мкм

ществляется термосклеяка двух слоев ее стенки. Каптон обладает лучшей радиационной стойкостью, а майлар — меньшими гигроскопическим расширением и газовой проницаемостью. В основном сейчас используются каптоновые пленки. Для внутреннего слоя стенки это проводящие пленки с углеродным наполнением (loaded film) [11] или однородные пленки, покрытые тонким слоем полиимида с 55 % графита (coated film) [24, 13], а также однородные пленки, металлизированные слоем Al [19, 28] или Cu толщиной 1000–1500 Å [22]. Медное покрытие предпочтительнее алюминиевого, так как проводимость CuO значительно лучше, чем Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, кроме того, работа выхода у Cu ≈ 4,65 эВ и у Al ≈ 4,28 эВ, следовательно, катод менее чувствителен к выходу электронов. На рис. 2 видны межстриповые швы наружного слоя стенки трубки шириной около 0,1 мм.

Намотанные симметричные трубки имеют высокую цилиндричность и однородность диаметра независимо от их длины. Обычно используются строу диаметром от 4 до 10 мм, возможна намотка трубок большего диаметра; так, при разработке строу-камер для спектрометра COMPASS был изготовлен прототип со строу диаметром 15 мм. Толщина стенок обычно 60–70 мкм [11], однако сейчас изготавливаются трубки со стенками ≤ 30 мкм [22].

Для эксперимента МЕСО/Му2е были разработаны бесшовные (симметричные) трубки методом экструзии обогащенного углеродом пластика РЕЕК

через фильеры. Метод позволяет изготавливать трубки длиной до 1 м и диаметром 5 мм со стенками толщиной 25 мкм [29].

Для анода в зависимости от длины строу используют обычно золоченую вольфрамовую проволоку диаметром от 20 до 30 мкм с добавкой 3% рения, что увеличивает диапазон ее упругого удлинения.

**1.2. Собственные характеристики.** При установке анодной проволоки с низким натяжением возможен ее гравитационный провис, а при подаче на электроды высоковольтного напряжения на единицу длины анода действует сила  $F$ , приводящая к смещению его средней точки на величину  $\delta$ , которая может быть оценена выражением [30]

$$\delta = L^2 F / 8T,$$

где  $L$  — длина анодной проволоки;  $T$  — ее натяжение, а величина электростатической силы  $F$ , возникающей из-за всегда имеющего место отклонения анодной проволоки от оси строу на величину  $d$ , определяется как

$$F = \frac{2\pi\varepsilon_0 V^2 d}{R^2 (\ln(R/r))^2},$$

где  $V$  — потенциал анода;  $r$  — его радиус и  $R$  — внутренний радиус строу. Выражения позволяют оценить необходимую величину натяжения анодной проволоки для устранения электростатического ее прогиба.

При прохождении импульса вдоль резистивного анода его величина уменьшается в зависимости от времени нарастания переднего фронта из-за скин-эффекта, обратно пропорционального корню квадратному частоты электромагнитной волны. Частотные свойства сигналов от  $\gamma$ -источника  $^{55}\text{Fe}$ , используемого для предварительного тестирования и настройки параметров газонаполненных координатных детекторов, около 300 МГц, а сигналов от минимально ионизирующих частиц (МИР) — менее 100 МГц. Глубина скин-слоя используемых проволок для частоты 100 и 300 МГц около 12,7 и 7,3 мкм соответственно [31, 32].

Дрейфовую трубку можно рассматривать как волновод с волновым сопротивлением  $Z_0$ , параметры которого рассчитываются по формулам [33, 34]

$$\frac{C}{l} = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\ln(R/r)}, \quad \frac{C}{l} = \frac{\mu}{2\pi} \ln(R/r),$$

где  $\varepsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon$  — диэлектрическая и  $\mu$  — магнитная проницаемости;  $l$  — длина строу. Волновое сопротивление можно оценить, как [35]

$$Z_0 = 60 \ln(R/r),$$

а скорость прохождения электромагнитной волны по аноду составляет  $\sim 0,29 \text{ м} \cdot \text{нс}^{-1}$  [36].

## 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

**2.1. Ионизация газов, газовое усиление.** При прохождении заряженных частиц через газ происходит его первичная и затем вторичная ионизация от быстрых первичных электронов с кинетической энергией, достаточной для ионизации атомов газа. Таким образом, ионизация носит кластерный характер и полное число электрон-ионных пар составляет  $n_T \approx (3-4)n_p$ , где  $n_p$  — количество первично образованных пар. Вероятность количества  $n_p$  для частиц, пересекающих слой газа толщиной  $L$ , определяется распределением Пуассона [37]:

$$P(n_0, L) = \frac{(L/\lambda)^{n_0} \exp(-L/\lambda)}{n_0!},$$

где  $\lambda$  — среднее расстояние между двумя актами ионизации, а среднее число пар равно

$$n_p = L/\lambda.$$

В отсутствие электрического поля свободные электроны с тепловой энергией  $3kT/2$  рассеиваются на атомах газа и двигаются случайным образом. При наличии электрического поля электроны дрейфуют к аноду, а ионы к катоду. В газовых смесях с добавкой, имеющей низкий потенциал ионизации, положительные ионы могут ионизировать ее молекулы, например,  $\text{CO}_2$  с  $I_0 = 13,7$  эВ. В табл. 1 приведены параметры газов, определяющие процессы ионизации их заряженными частицами [38].

Таблица 1. Свойства газов при нормальных условиях

Газ	$Z$	$A$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$E_{\text{ex}}$ , эВ	$E_i$ , эВ	$I_0$ , эВ	$W_i$ , эВ	$(dE/dx)_0$ , кэВ/см	$n_p$ , см <sup>-1</sup>	$n_T$ , см <sup>-1</sup>
He	2	4	$1,66 \cdot 10^{-4}$	19,8	24,5	24,6	41	0,32	5,9	7,8
N <sub>2</sub>	14	28	$1,17 \cdot 10^{-3}$	8,1	16,7	15,5	35	1,96	(10)	56
O <sub>2</sub>	16	32	$1,33 \cdot 10^{-3}$	7,9	12,8	12,2	31	2,26	22	73
Ne	10	20,2	$8,39 \cdot 10^{-4}$	16,6	21,5	21,6	36	1,41	12	39
Ar	18	39,9	$1,66 \cdot 10^{-3}$	11,6	15,7	15,8	26	2,44	29,4	94
Kr	36	83,8	$3,49 \cdot 10^{-3}$	10,0	13,9	14,0	24	4,60	(22)	192
Xe	54	131,3	$5,49 \cdot 10^{-3}$	8,4	12,1	12,1	22	6,76	44	307
CO <sub>2</sub>	22	44	$1,86 \cdot 10^{-3}$	5,2	13,7	13,7	33	3,01	(34)	91
CH <sub>4</sub>	10	16	$6,70 \cdot 10^{-4}$		15,2	13,1	28	1,48	16	53
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	34	58	$2,42 \cdot 10^{-3}$		10,6	10,8	23	4,50	(46)	195

*Примечание.*  $\rho$  — плотность;  $E_{\text{ex}}$  — минимальная энергия возбуждения;  $E_i$  — минимальная энергия ионизации;  $I_0 = I/Z$  — средний потенциал ионизации атомного электрона;  $W_i$  — потери на образование электрон-ионных пар;  $(dE/dx)_0$  — минимальные энергетические потери;  $n_p$  — число первичных пар на 1 см пути для минимального потенциала ионизации;  $n_T$  — полное число пар.



Типичные собственные шумы усилителей  $\sim 1000e^-$ , а количество образующихся в газе электрон-ионных пар не велико; так, в газовой смеси  $Ag/CO_2$  (80/20 %) в строу диаметром 4 мм величина  $n_T \approx 31$ . Следовательно, для регистрации событий необходимо дополнительное газовое усиление. Величина газового усиления  $G$  определяется первым коэффициентом Таунсенда  $\alpha$  [39, 40], определяющим число вызывающих ионизацию соударений электронов с молекулами газа на пути в 1 см. Коэффициент  $\alpha$  зависит от напряженности электрического поля, обратно пропорционален величине свободного пробега электронов  $\lambda$  в газе и может быть представлен выражением

$$\alpha = aPe^{-\frac{b}{E/P}},$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные для данного газа коэффициенты;  $E$  — напряженность поля и  $P$  — давление газа. При прохождении частицей слоя газа от первичных  $n_p$  электронов образуется полное количество электронов  $n_T$  и коэффициент газового усиления  $G$  определяется как

$$G = \frac{n_T}{n_p} = \exp\left(\int_r^x \alpha(x) dx\right),$$

где  $x$  — расстояние от места возникновения первичной ионизации до анода. Заметим, что средняя толщина газа в строу диаметром  $d$  равна  $\sim 0,83d$ .

**2.2. Принцип действия.** Строу представляет собой цилиндрическую трубку с проводящим внутренним слоем — катодом и соосной ему тонкой проволокой — анодом. Величина электрического поля вдоль радиуса строу изменяется обратно пропорционально расстоянию  $r_i$  и определяется выражением

$$E(r_i) = \frac{V}{r_i \ln(R/r)},$$

где  $V$  — напряжение между электродами строу;  $r_i$  — радиальное расстояние от анода. Сильное электрическое поле вблизи поверхности анода в несколько его радиусов достигает величины более  $10^5$  В/см. Первичные электроны ионизации в сильном электрическом поле в результате неупругих столкновений с атомами газа образуют у поверхности анода электронную лавину. Производимая ими вторичная ионизация обеспечивает газовое усиление  $G$ , достаточное для регистрации индукционных анодных и катодных сигналов от движения положительных ионов к катоду при пренебрежимо маленьком вкладе от движения электронов к аноду.

В зависимости от того, как рассматривается анодная проволока — в качестве источника тока или напряжения, регистрируемый усилителем сигнал

описывается соответственно выражениями [42]

$$I(t) = q \frac{d}{dt} F(t), \quad \Delta V(t) = \frac{q}{C} F(t),$$

где

$$F(t) = \frac{\ln(1 + t/t_0)}{\ln(1 + t_{\max}/t_0)},$$

$q$  — положительный заряд лавины;  $C$  — емкость между анодом и катодом; константы:  $t_0$  имеет величину  $\sim 1$  нс и  $t_{\max}$  (время подхода положительных ионов к катоду) — несколько микросекунд. Рис. 3 показывает наводимый на анод токовый сигнал от источника  $^{55}\text{Fe}$ , вызываемый отходом облака положительных ионов от локального месторасположения электронной лавины (быстрая часть сигнала) и продвижением его далее к катоду (длинный хвост с микросекундной длительностью).

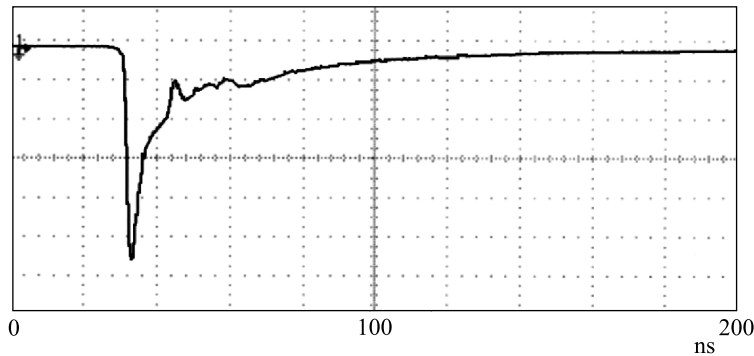


Рис. 3. Токвый сигнал с анода строу диаметром 10 мм от источника  $^{55}\text{Fe}$ . Газовая смесь  $\text{Xe}/\text{CF}_4/\text{CO}_2$  в пропорции 65/30/5% [41]. Пики на хвосте импульса вызваны его суперпозицией с отражениями от концов недостаточно хорошо согласованного строу

Принципиальная схема получения координатной информации о ближайшей к аноду точке пересечения частицей строу, определяемой измерением времени дрейфа ионизированного электрона к анодной проволоке, показана на рис. 4. При этом измеряется радиальная координата электронов ближайшего к аноду кластера, определяя радиус соосной аноду и катоду поверхности цилиндра с расположенными на ней электронами, вызвавшими лавину. Для устранения лево-правой неопределенности для треков проходящих частиц, аналогично ДК, строу-камеры содержат два слоя строу, сдвинутых между собой на величину их радиуса. Стереokoордината точки траектории частицы определяется по информации с нескольких различно ориентированных строу-камер, пересекаемых частицами. Наличие в трекаре камер с наклонами их

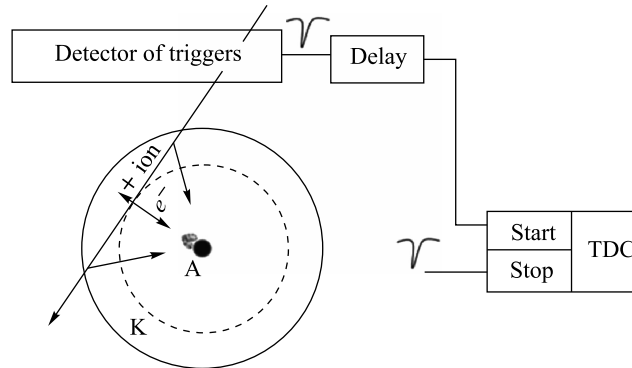


Рис. 4. Схема измерения времени дрейфа ионизированных электронов относительно момента пересечения детектора заряженной частицей. TDC — времяцифровой преобразователь

строу, различающимися на угол  $\beta$ , позволяет определять продольную координату ( $Z$ ) вдоль анодов с точностью [18]

$$\sigma_z = \sigma_r / \sin \beta,$$

где  $\sigma_r$  — радиальное разрешение. Координаты пересечения заряженными частицами анодной плоскости слоя строу определяются как  $n_i \pm r_i$ , где  $n_i$  определяет координату анодной проволоки данного канала регистрации и  $r_i$  — радиальное расстояние, полученное измерением времени прохода электронов ионизации по части радиуса строу к аноду со скоростью дрейфа  $V_d$  относительно времени пролета частицы:

$$r_i = \int V_d(t_i) dt.$$

Радиальная точность зависит не только от точности знания пространственных координат проволочных анодов, но и от вида газовой смеси, величин электрического и магнитного полей, влияющих на дрейфовую скорость электронов. В близкой к аноду области скорость дрейфа электронов можно рассматривать как постоянную величину, тогда как с приближением к катоду уменьшается напряженность поля, что может приводить к ее уменьшению. На рис. 5 для газовой смеси Ar/CO<sub>2</sub> (80/20 %) показаны значения скорости дрейфа электронов в этой области для строу диаметром 4,0; 6,0 и 9,53 мм при двух значениях газового усиления, т. е. при разных значениях электрического поля. Видно, что с увеличением диаметра строу возрастает область с уменьшенными величинами скорости дрейфа электронов. Так, для строу диаметром менее 6 мм при приближении к катоду изменения величины скорости дрейфа малы, тогда как при большем диаметре область снижения скорости дрейфа

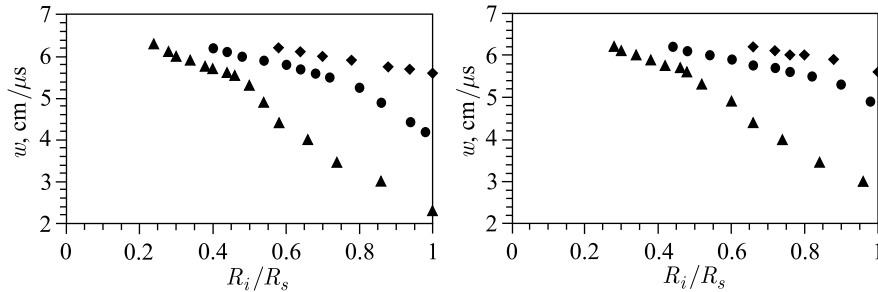


Рис. 5. Скорость дрейфа вдоль радиуса строу радиусом  $R_s$ : 4 (◆); 6 (●) и 9,53 мм (▲). Газовая смесь Ar/CO<sub>2</sub> (80/20 %). Использовались данные рис. 45, 49 и 63 из работы [44]. Слева: газовое усиление  $2 \cdot 10^4$  (анодное напряжение 1,387; 1,521 и 1,655 кВ соответственно). Справа: газовое усиление  $8 \cdot 10^4$  (анодное напряжение 1,570; 1,718 и 1,850 кВ соответственно)

равна приблизительно половине радиуса и уменьшение скорости достигает фактора 2 [43].

Соотношения между измеряемыми временами и соответствующими им радиальными расстояниями, так называемые V-плоты (или R–T-зависимости), калибруются с использованием внешних триггерного и трекового детекторов, позволяющих измерять отклонение значений  $r_i$  хитов со строу от реального трека частиц. На рис. 6 показаны два V-плота со строу диаметром 6 и 4 мм. Видна возможность линейной интерполяции зависимостей, кроме области в несколько сотен микрометров у анода и катода.

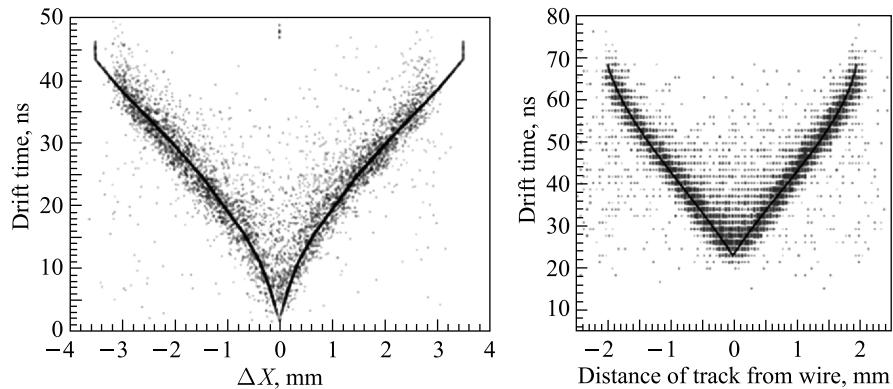


Рис. 6. Времякоординатные распределения (V-плоты). Слева: отклонения от треков 160-ГэВ мюонов для строу диаметром 6 мм, газовая смесь ArCO<sub>2</sub> [11]. Справа: отклонения от треков, реконструируемых в Si-стриповом телескопе, диаметр строу 4 мм, газовая смесь Ar/CO<sub>2</sub> (70/30 %) [13]

При наличии магнитного поля  $B$ , направленного ортогонально электрическому полю  $E$ , электроны двигаются под углом Лоренца  $\beta$  к силовым линиям электрического поля. Величина угла определяется отношением ортогональной и параллельной скоростей [41]:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} \approx \frac{eB\tau}{m} \quad \text{и} \quad \tau \sim \frac{\sqrt{\eta}}{N\sigma},$$

где  $V$  — скорость дрейфа в электрическом поле;  $e$  и  $m$  — заряд и масса его носителя;  $\tau$  — среднее время между двумя столкновениями;  $\eta$  — средняя потеря энергии на столкновение;  $\sigma$  — сечение столкновений с молекулами/атомами  $N$  газовых компонентов.

Скорость в поле величиной  $B$  определяется как  $V_B = V \cos \beta$ , следовательно, магнитное поле уменьшает дрейфовую скорость. При большом угле Лоренцадвигающиеся электроны могут спирально закручиваться вокруг анода, как это показано на рис. 7, что может быть существенным в больших магнитных полях и для газов с большим временем дрейфа.

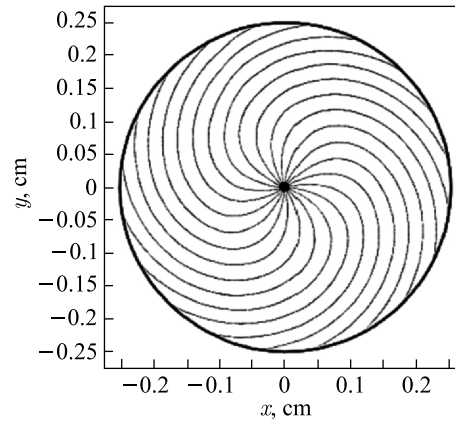


Рис. 7. Моделирование линий дрейфа электронов в строу радиусом 5 мм в быстрой газовой смеси  $\text{Ag}(70)/\text{CF}_4(30)$ . Магнитное поле величиной 1,6 Тл направлено вдоль анода строу [41]

В табл. 2 приведены значения полного времени сбора электронов (верхняя строка) и пространственного разрешения (нижняя строка) для трех вариантов газовой смеси на основе  $\text{Ag}$  с гасящей добавкой  $\text{CO}_2$  и добавкой быстрого газа  $\text{CF}_4$  для различных значений магнитного поля  $B$ , параллельного аноду строу. Видно уменьшение скорости дрейфа с ростом магнитного поля, приводящее к увеличению времени сбора электронов ионизации и вызывающее некоторое улучшение пространственного разрешения.

Таблица 2. Время сбора электронов (нс) и пространственное разрешение ( $\sigma$ , мкм) для различных значений магнитного поля. Газовые смеси: Ar/CO<sub>2</sub>/CF<sub>4</sub>. Строу-трекер установки LHCb (ЦЕРН), диаметр строу 5 мм [16]

Ar/CO <sub>2</sub> /CF <sub>4</sub>	$B = 0$ Тл	$B = 0,72$ Тл	$B = 1,00$ Тл	$B = 1,37$ Тл
65/35/5	30	31	34	38
	230	220	215	205
75/20/5	33	34	38	42
	210	205	205	190
65/5/30	39	41	43	46
	155	150	145	140

Полное время сбора электронов в строу TRT ATLAS радиусом 2 мм в магнитном поле 2 Тл составляет 40 нс вместо 38 нс при его отсутствии, что соответствует  $\sim 100$  мкм в единицах длины.

**2.3. Режимы работы.** Скорость дрейфа электронов в электрическом поле дрейфовых трубок в наиболее используемых газовых смесях ArCO<sub>2</sub> около 5 см/мкс, т.е. время прохождения 1 мм пути вдоль радиуса  $r$  равно  $\sim 20$  нс. Скорость ионов примерно в 1000 раз меньше. Эти временные величины определяют время сбора выделенного в детекторе заряда и возможное быстроедействие детектора. Например, в строу диаметром 10 мм полное время сбора электронов составляет  $\sim 100$  нс. В зависимости от параметров регистрирующих сигналы усилителей в быстрых детекторах регистрируется  $\sim 10$ –15 % выделенного заряда.

Рис. 8 показывает возможные режимы работы строу в зависимости от напряженности электрического поля. В режиме пропорционального усиления (Р) собираемые на аноде электроны при высокой напряженности поля образуют у поверхности анода лавины за время менее 1 нс. При этом величина регистрируемых сигналов пропорциональна выделенной в газе энергии, что позволяет оценивать ее для идентификации частиц, например, как планируется в строу-детекторах установки PANDA. Регистрация MIP в этом режиме в зависимости от регистрирующей электроники возможна при газовом усилении в диапазоне от  $\sim 10^3$  до  $4 \cdot 10^4$ . Собственное энергетическое разрешение строу ( $\Delta E/E$ , полная ширина спектра сигналов на половине высоты распределения), измеряемое при регистрации  $\gamma$ -квантов с энергией 5,9 кэВ от источника <sup>55</sup>Fe, около 17 % и несколько ухудшается с увеличением  $G$ .

При дальнейшем повышении напряжения вокруг места развития лавины образуется облако положительных ионов, уменьшающих локальную напряженность электрического поля и ограничивающих величину сигналов, — так называемый режим ограниченной пропорциональности (LP), газовое усиление в котором может быть в диапазоне  $4 \cdot 10^4 < G \leq 8 \cdot 10^4$ . На рис. 9 показаны

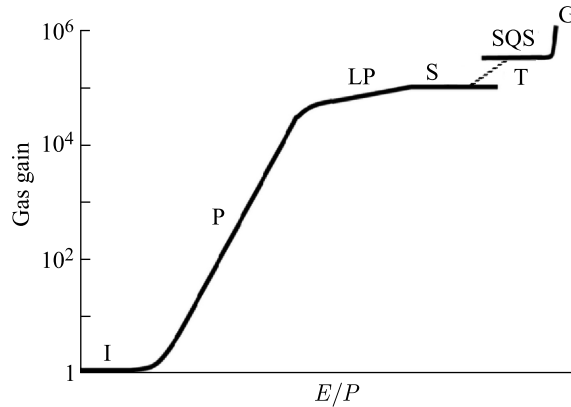


Рис. 8. Режимы работы строу в зависимости от напряженности электрического поля: I — ионизационный; P — пропорциональный; LP — ограниченно-пропорциональный; S — насыщенный; SQS — самогасящийся стримерный; G — гейгеровский. Как и SQS, режим T может наблюдаться при специальных условиях и будет подробно рассмотрен далее

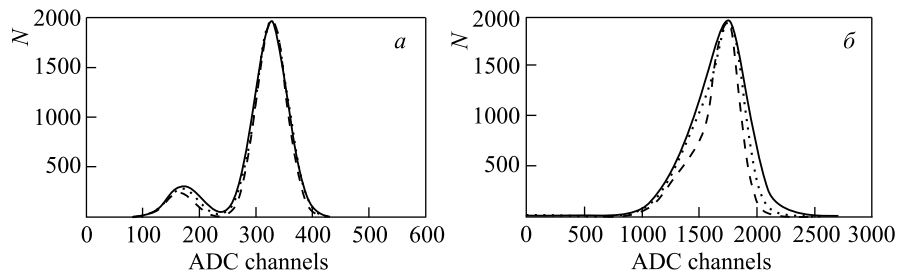


Рис. 9. Энергетическое разрешение строу диаметром 4 (сплошная линия), 6 (точечная) и 9,56 мм (штриховая). а) Газовое усиление  $\sim 2 \cdot 10^4$ , анодное напряжение этих строу 1,387; 1,521 и 1,655 кВ соответственно. б) Газовое усиление  $\sim 8 \cdot 10^4$ , анодное напряжение 1,570; 1,718 и 1,850 кВ соответственно. Регистрировались  $\gamma$ -кванты с энергией 5,9 кэВ. Газовая смесь Ar/CO<sub>2</sub> (80/20%)

типичные сигналы со строу разного диаметра при одинаковом газовом усилении и считывающей электронике для газовой смеси Ar/CO<sub>2</sub> (80/20%) [43]. Энергетическое разрешение строу при  $G \approx 2 \cdot 10^4$  составляет 18% (рис. 9, а) и ухудшается при  $G \approx 8 \cdot 10^4$  в режиме ограниченной пропорциональности до  $\sim 30\%$  (рис. 9, б). Видно, что при равных значениях  $G$  величины  $\Delta E/E$  практически не зависят от диаметра строу в обоих режимах, хотя в режиме LP заметно ухудшение для строу меньшего диаметра, что определяется снижением технологической точности сборки строу.

С увеличением  $G$  начинают появляться задержанные на полное время сбора электронов ионизации вторичные импульсы от электронов, выбиваемых УФ-излучением первичной лавины. Возможен также выход электронов от положительных ионов, подходящих к катоду. Режим LP широко используется в треках для улучшения отношения сигнал/шум.

Режим насыщения сигналов S, как и LP, применяется с той же целью, так как при вводе в состав газовой смеси гасящих добавок возможно увеличение плато сигналов в зависимости от напряженности электрического поля, а следовательно, и уменьшение диапазона величин сигналов от детектируемых заряженных частиц. При этом повышается эффективность регистрации маленьких сигналов, например, при стриповом или пэдвом катодном считывании [45, 46]. Из режима насыщения при определенных условиях возможен скачкообразный переход в самогасящийся стримерный режим SQS и далее в режим Гейгера–Мюллера [47]. В режиме SQS с повышением поля лавина разрастается вокруг анодной проволоки за счет вторичных процессов, полностью охватывая анод и развиваясь далее вдоль него. Из-за сильного выхода УФ-излучения при этом наблюдается большое количество вторичных сигналов, удаленных от первичной лавины по аноду. Эти режимы не используются в строу, хотя могут наблюдаться при регистрации фоновых событий от тяжелых ионов и нейтронов, при этом возможен обрыв анодной проволоки и разгерметизация строу из-за прожига стенки.

В специальных условиях с возрастанием напряжения наблюдался переход из режима LP/S в режим T, далее переходящий в SQS. В п. 4.5 переходной режим T будет рассмотрен подробнее.

**2.4. Газовые смеси.** Выбираемые газовые смеси должны удовлетворять следующим требованиям к детекторам экспериментальной установки: высокое газовое усиление для эффективной регистрации частиц; большая дрейфовая скорость и короткое время сбора электронов ионизации для обеспечения высокого быстродействия или низкие дрейфовая скорость и коэффициент диффузии для получения высокого пространственного разрешения; широкое плато по высоковольтному напряжению для обеспечения высокой однородности многоканальных детекторов; высокая радиационная стойкость для долговременной работы в условиях высоких радиационных нагрузок; высокая чистота газа, отсутствие химической агрессивности по отношению к окружающим материалам для исключения эффектов полимеризации и невоспламеняемость для безопасной эксплуатации. Для детекторов переходного излучения необходима высокая эффективность поглощения квантов переходного излучения, что обеспечивается газовой смесью на основе Xe, тогда как для треков основным компонентом газовой смеси является Ar.

В слабом электрическом поле или в смеси с добавками, обладающими высокими гасящими свойствами, электроны находятся в тепловом равновесии с окружающей средой и скорость дрейфа пропорциональна напряженно-



сти электрического поля. Такие газы называются «холодными» и требуют сильного электрического поля. Увеличение парциального давления  $\text{CO}_2$ , являющегося холодным газом, в газовой смеси приводит к некоторому ее «охлаждению», т. е. к увеличению изменения скорости дрейфа вдоль радиуса трубок с большим диаметром. Напротив, если средняя кинетическая энергия электронов отличается от тепловой энергии, скорость дрейфа слабо зависит от напряженности электрического поля, насыщается, становится постоянной вдоль радиуса строу, что облегчает реконструкцию треков частиц. Такие газы называются «горячими».

При перемещении электронов к аноду за время  $t$  происходит разброс их координат, среднеквадратичное отклонение которого равно

$$\sigma^2 = 2Dt = 2\varepsilon_g x / eE,$$

где  $D$  — коэффициент диффузии;  $\varepsilon_g$  — характеристическая энергия электронов, способная существенно возрасть для некоторых газов в сильных электрических полях. Однако из-за большой диффузии «горячих» газовых смесей пространственное разрешение ухудшается, что может частично устраняться повышением абсолютного давления газа. В электрическом поле  $E/P > 10^{-3}$  В/(см·мм рт. ст.) диффузия вдоль и поперек электрического поля  $D_L$  и  $D_T$  различна. В Ag и Xe отношение  $D_T/D_L$  примерно равно 7 и 10 соответственно [48]. Коэффициент продольной диффузии в направлении электрического поля в смеси Ag/CO<sub>2</sub> (90/10 %) при увеличении давления от 1 до 2 бар уменьшается незначительно, тогда как коэффициент поперечной диффузии, имеющий более высокую величину, уменьшается почти в два раза. Проблема выбора обычно стоит между «теплой» или «холодной» газовой смесью.

Для МПК и ДК широко использовалась смесь Ag/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (50/50 %). Для уменьшения эффектов старения в состав смеси вводилась небольшая добавка спирта. Использование этой смеси для строу с каптоновыми стенками исключено из-за ослабления натяжения каптоновой пленки даже при низкой добавке этанола. В качестве гасящего компонента, расширяющего плато по напряжению, сейчас в основном используется CO<sub>2</sub>, обладающий низкой продольной диффузией электронов, хорошим поглощением УФ-фотонов и маленькой величиной угла Лоренца.

На рис. 10 приведены спектры сигналов при равномерном облучении строу диаметром 4 и 9,53 мм электронами с энергией 3,55 МэВ. Кривые 1 получены для газовой смеси Ag/CO<sub>2</sub> (70/30 %). Кривые 2, 3 и 4 на рис. 10, а и 10, б (для строу диаметром 4 и 9,53 мм соответственно) получены при добавках CF<sub>4</sub> с различным его парциальным давлением. Видно уменьшение времени сбора электронов, особенно с увеличением их дрейфового пути, а также улучшение переднего фронта сигналов, что важно для обеспечения

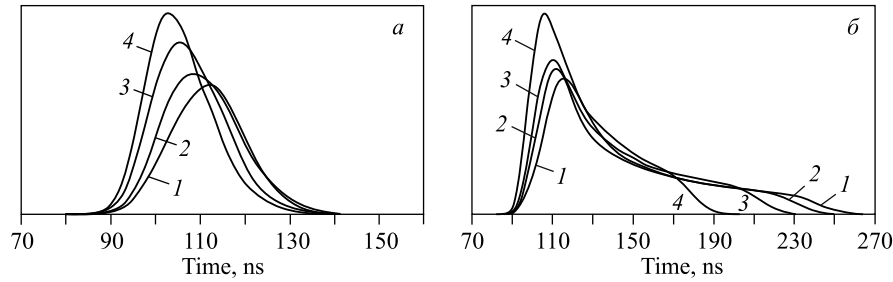


Рис. 10. Влияние парциального давления  $\text{CF}_4$  на время дрейфа электронов для строу диаметром 4 мм (а) и 9,53 мм (б). Кривые 1 — газовая смесь  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  (70/30 %); 2 —  $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$  (63/32/5 %); 3 —  $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$  (63/27/10 %); 4 —  $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$  (63/17/20 %)

точной временной привязки событий к моменту пролета регистрируемой частицы [49].

Для предохранения от изменений влажности окружающей среды строу-детекторы обычно окружены  $\text{CO}_2$  или, что дешевле, азотом. Исследования, выполненные для ВТeV-детекторов на основе строу, показали, что при окружении азотом возможно его попадание в газовую смесь; так, при появлении 1 % азота газовое усиление в смеси  $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{N}_2$  (79,5/19,5/1,0 %) уменьшается на 20 % [50].

Гидрокарбонатные газы обладают хорошими гасящими свойствами, но предрасположены к выделению осадка на аноде, как и силикон при его присутствии в строу. При наличии  $\text{CF}_4$ , помимо уменьшения времени сбора электронов и увеличения плато по напряжению, при облучении строу образуются фторосодержащие примеси ( $\text{HF}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{F}_2$  и др.), удаляющие осадок с анодной проволоки. Чистящие свойства  $\text{CF}_4$  могут применяться в качестве ингибитора процессов старения строу. Однако наличие водяных паров приводит к реакции с образованием кислотного соединения, разрушающего стекло, что наблюдалось в барреле TRT ATLAS и привело к отказу от применения  $\text{CF}_4$  в составе газовой смеси из-за наличия в строу соединительных стеклянных втулок [51].

В качестве альтернативы  $\text{CF}_4$  для TRT ATLAS была предложена добавка нескольких процентов кислорода; некоторые результаты сравнительного изучения свойств газовых смесей с этими добавками показаны на рис. 11 и в сводной табл. 3 [49].

Временные зависимости измерялись при облучении строу источником  $^{106}\text{Ru}$  и напряжении на строу, соответствующем газовому усилению  $\sim 10^5$ . Добавка 20 %  $\text{CF}_4$  уменьшает чувствительное время, определяемое полным временем сбора электронов ионизации, на 10 % для строу диаметром 4 мм и на 42 % для строу диаметром 15 мм. Добавка  $\text{O}_2$  в количестве, сохраняющем

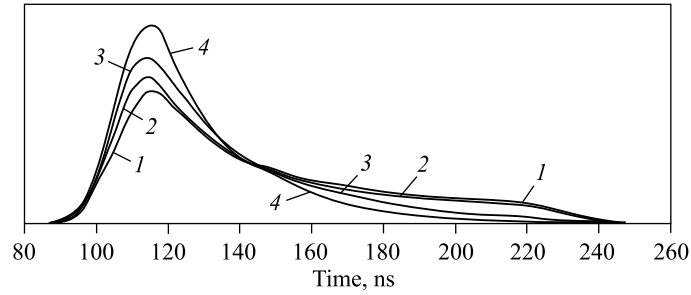


Рис. 11. Влияние парциального давления  $O_2$  на распределение времени прихода сигналов в строу диаметром 9,56 мм при газовом усилении  $G = 10^5$ . Кривая 1 — газовая смесь  $Ar/CO_2$  (70/30 %); 2 —  $Ar/CO_2/O_2(70/30)/0,8$ ; 3 —  $Ar/CO_2/O_2$  (70/30)/1,5; 4 —  $Ar/CO_2/O_2$  (70/30)/3

Таблица 3. Время дрейфа электронов  $\tau_{max}$  и эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов источника  $^{55}Fe$  ( $\epsilon_\gamma$ , %) в строу диаметром 4; 6; 9,56; 15 мм в случаях их неполной эффективности для различного содержания  $O_2$  в газовой смеси  $ArCO_2$ . Также приведено  $\tau_{max}$  в этих же строу для газовой смеси  $ArCO_2$  с добавкой  $CF_4$

Состав газовой смеси	$\tau_{max}$ , нс ( $\epsilon_\gamma$ , %)			
	$\varnothing$ 4 мм	$\varnothing$ 6 мм	$\varnothing$ 9,56 мм	$\varnothing$ 15 мм
$Ar/CO_2$ (70/30)	38	68,4	129	309
$Ar/CO_2/O_2$ (70/30)/0,8	38,7	64,1	135 (99,7)	278,7 (78,3)
$Ar/CO_2/O_2$ (70/30)/1	37	63,2 (99,6)	129 (89,9)	275,3 (72,6)
$Ar/CO_2/O_2$ (70/30)/1,5	36,5	59,5 (99,4)	119,7 (70,1)	149,6 (62,6)
$Ar/CO_2/O_2$ (70/30)/3	36	56,2 (99,3)	102,6 (66,6)	108,5 (59,6)
$Ar/CO_2/CF_4$ (63/32/5)	36,5	66,7	144	320
$Ar/CO_2/CF_4$ (63/27/10)	36	60	119	262
$Ar/CO_2/CF_4$ (63/17/20)	34	45	99	178

эффективность регистрации частиц, оказывает малое влияние на величину чувствительного времени.

Представленные временные спектры показывают, что для используемой считывающей электроники добавка 3%  $O_2$  в состав газовой смеси приводит к изменению фронта распределений со стороны малых времен прихода сигналов на величину  $\sim 3,5$  нс. Видно, что добавка 20%  $CF_4$  уменьшает передний фронт распределений на  $\sim 8$  нс. Из гидрокарбонатных газов хорошо известны используемые ранее в качестве гасящих добавок для МПК и ДК метан ( $CH_4$ ), этан ( $C_2H_6$ ) и изобутан ( $C_4H_{10}$ ).

При реконструкции треков частиц с невысоким поперечным импульсом основную ошибку может вносить многократное кулоновское рассеяние на

веществе детектора. Импульсное разрешение может быть оценено выражением [52]

$$\frac{\Delta p_t}{p_t} = \frac{0,053}{BLW} \sqrt{\frac{x}{X_0}},$$

где  $p_t$  — поперечный импульс;  $B$  — магнитное поле (Тл);  $L$  — длина трека (м);  $W$  — скорость частицы;  $x$  — радиационная толщина и  $X_0$  — радиационная длина вещества детектора. В табл. 4 приведены характеристики некоторых смесей. Очевидно, что для уменьшения многократного рассеяния и улучшения импульсного разрешения детектора в ряде случаев целесообразно использование газа с низким  $Z$ , например, смесей на основе He с радиационной длиной 5299 м вместо Ar с радиационной длиной 110 м.

Газовые смеси на основе He имеют низкую среднюю энергию электронов, например, в бинарных смесях средняя энергия находится в диапазоне  $\sim 1-2$  эВ, а в трехкомпонентных — менее 0,3 эВ. Диффузия электронов в электрическом поле пропорциональна корню квадратному их средней энергии. Так, среднеквадратичное отклонение ( $\sigma_L$ ) координат частиц на дрейфовом пути 1 см в газовых смесях на основе He может быть  $\sim 120$  мкм, тогда как в смесях на основе Ar — в диапазоне 160–200 м.

Гелиевые смеси имеют также меньший угол Лоренца и скорость дрейфа электронов, в 1,5–2 раза меньшую, чем аргоновые смеси; некоторые параметры газов приведены в табл. 4. Уменьшение скорости дрейфа повышает пространственное разрешение, но ограничивает возможность использования этих смесей в условиях высоких нагрузок.

Таблица 4. Параметры газовых смесей на основе гелия

Газ	Соотношение компонентов	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Радиационная длина, м	$n_p^*$ , см <sup>-1</sup>	$n_T^*$ , см <sup>-1</sup>
He		$1,78 \cdot 10^{-4}$	5299	4,8	8
Ne		$9,00 \cdot 10^{-4}$	345	12	43
Ar		$1,78 \cdot 10^{-3}$	110	24,3	94
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		$2,59 \cdot 10^{-3}$	169	84	195
CO <sub>2</sub>		$1,98 \cdot 10^{-3}$	183	35,5	91
He/iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	90/10	$4,2 \cdot 10^{-4}$	1313	12,7	26,7
He/iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	80/20	$6,6 \cdot 10^{-4}$	749	20,6	45,4
He/iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	70/30	$9,0 \cdot 10^{-4}$	524	28,6	64,1
He/CO <sub>2</sub>	90/10	$3,58 \cdot 10^{-4}$	1396	8,0	16,3
He/CO <sub>2</sub>	80/20	$5,38 \cdot 10^{-4}$	804	10,9	24,6
He/CO <sub>2</sub>	70/30	$7,19 \cdot 10^{-4}$	565	14,0	32/9
He/CO <sub>2</sub> /iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	89/10/10	$5,99 \cdot 10^{-4}$	776	15,8	35

\* 20 °С, 1 бар, для МIP [52].

**2.5. Влияние параметров окружающей среды.** В процессе эксплуатации больших детекторов проблематично обеспечить их температурную стабилизацию, независимую от изменений в окружающей среде. Так, температура различных частей строу-детекторов ЕС ATLAS TRT различалась в пределах  $10^\circ\text{C}$  даже при их принудительном охлаждении, подобная ситуация была и со строу-трекером COMPASS. Температурные вариации газовой смеси, как и изменение давления, изменяют ее плотность, влияя на величину газового усиления. Корректировать эти изменения возможно с помощью мониторинговых детекторов, контролирующих величины амплитуд сигналов и поддерживающих их изменением рабочего напряжения. При R&D и создании TRT ATLAS были определены коэффициенты изменения газового усиления в зависимости от температуры и давления рабочей газовой смеси. Было показано, что температурный коэффициент  $k_T$  и коэффициент зависимости от давления  $k_P$  для газовой смеси  $\text{Xe}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$  (70/10/20 %) равны 2,6 % на  $1^\circ\text{C}$  и 0,66 % на 1 мбар соответственно. Для обеспечения высокой точности реконструкции треков частиц температуру газовых смесей детекторов желательно поддерживать в пределах нескольких градусов [53].

**2.6. Строу-трекеры ускорительных установок.** TRT ATLAS является детектором переходного излучения и одновременно трекером внутреннего детектора установки, предназначенной для наблюдения таких процессов, как образование бозона Хиггса или суперсимметричных частиц при энергии столкновения протонов 13,5 ТэВ в системе центра масс сталкивающихся пучков при светимости до  $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , со скважностью сгустков протонных пучков в 25 нс. Эффективно используемый TRT создан на основе строу-трубок длиной 39 и 149 см и должен был работать на газовой смеси  $\text{Xe}/\text{CF}_4/\text{CO}_2$  в пропорции 70/20/10 %. Однако разрушение стеклянных элементов в строу баррельного TRT привело к переходу на смесь  $\text{Xe}/\text{CO}_2/\text{O}_2$  в пропорции 70/27/3 %, наиболее соответствующей требованиям детектора в условиях высоких загрузок в течение более чем 10-летней эксплуатации. Из-за высокой стоимости Xe был подобран режим работы строу с газовой смесью  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  в пропорции 70/30 % с добавкой и без  $\text{O}_2$ , эффективно используемый для целей тестирования модулей детектора, его запуска и включения в совместную работу с другими детекторами установки.

Особенностью TRT является маленький радиус строу, равный 2 мм, тогда как смещение анод-катодного расстояния (offset) может быть  $\geq 0,3$  мм, что при регистрации ионов или фоновых нейтронов из-за высокой величины их энергетических потерь может вызывать срабатывания строу в режимах SQS и Гейгера–Мюллера. На рис. 12 приведены величины превышения значения рабочего напряжения, при которых начинают появляться сильнотоковые сигналы, в зависимости от изменения анод-катодного расстояния от величины радиуса строу для газовых смесей  $\text{XeCO}_2$ ,  $\text{XeCO}_2\text{O}_2$  и  $\text{XeCF}_4\text{CO}_2$  [54]. Видно, что при добавке 20 %  $\text{CF}_4$  разряды появляются при превышении ра-

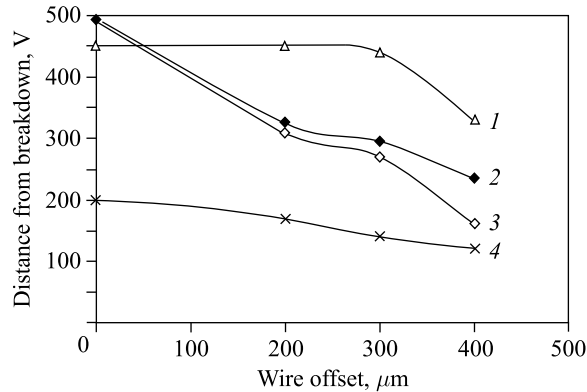


Рис. 12. Разница между значениями рабочего напряжения и напряжения, при котором начинаются разряды в строу, в зависимости от величины смещения анода от ее оси для некоторых газовых смесей: 1 — Xe/CF<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> (70/20/10); 2 — Xe/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> (70/27/3); 3 — Xe/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> (70/28/2); 4 — Xe/CO<sub>2</sub> (65/35)

бочего напряжения на 450 В. Без CF<sub>4</sub> в смеси XeCO<sub>2</sub> величина возможного превышения рабочего напряжения изменяется практически линейно от 200 до  $\sim 100$  В с уменьшением анод-катодного расстояния до 400 мкм. При добавке O<sub>2</sub> превышение допустимого напряжения возрастает до  $\sim 300$  В. При создании детектора, содержащего 250 000 строу, допуск на величину максимального отклонения анодов от оси составлял 300 мкм. Таким образом, при наличии возможных смещений анодной проволоки до 300 мкм и в редких случаях более основной функцией O<sub>2</sub> является снижение вероятности образования сигналов в режимах SQS и Гейгера–Мюллера. Происходит это как в результате захвата электронов электроотрицательными продуктами диссоциации O<sub>2</sub>, так и в результате образования в лавинах озона, обладающего высокой электроотрицательностью, и интенсивно поглощающих электроны массивных лавин, при которых возможны повреждения строу.

**Спектрометр ЛНСб**, предназначенный для изучения *CP*-инвариантности и редких *B*-распадов, содержит расположенные за дипольным магнитом внутренний (IT) и наружный (OT) трекары [55]. Силиконовый IT перекрывает близкую к пучковой трубе зону, а строу-трекер OT перекрывает остальную площадь акцептанса (6 × 5 м) модулями длиной 5 м и шириной 0,34 м. OT содержит 53 760 строу длиной 2,5 м и диаметром 5 мм с пространственным разрешением 200 мкм. При выборе газовой смеси изучались характеристики двух смесей: Ar/CO<sub>2</sub> (70/30 %) и Ar/CO<sub>2</sub>/CF<sub>4</sub> (75/10/15 %).

Высокозатратный проект BNL (США) — МЕСО — был остановлен ранее во FNAL (США). Сейчас рассматривается возможность выполнения проекта МЕСО/Mu2e, направленного (в числе многих предложений) на поиск цве-

товых нарушений заряженных лептонов (CLFV) на будущем ускорительном комплексе во FNAL [21, 22, 56]. В установке предполагается использовать два строу-трекера (Т и L) со строу диаметром 5 мм общим их количеством 15 760, расположенных в вакууме соленоидального магнита с однородным полем ( $\Delta B/B \pm 0,002$ ) величиной 1 Тл. В Т-трекере строу расположены ортогонально к оси соленоида, с каждой строу считывается временная и амплитудная информация. Строу имеют резистивный анод для определения азимутальных координат методом деления заряда. Задача трекера — высокоэффективное измерение параметров спиральных траекторий выходящих из мишени электронов. Длина строу в трекере от 30 до 70 см, толщина стенки 25–30 мкм. Разрешение 0,2 мм ( $x, y$ ).

L-трекер, содержащий 2800 строу длиной 2,9 м, обеспечивает разрешение 0,2 мм ( $r, \phi$ )  $\times$  1,5 мм ( $z$ ). Для строу будет использоваться газовая смесь  $\text{CF}_4/\text{C}_4\text{H}_{10}$  (80/20 %) с точностью парциального давления компонентов  $\pm 2,5\%$  при абсолютном давлении 1 бар и стабилизации температуры смеси в пределах  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Особое внимание будет уделено чистоте газовых компонентов и системы газообеспечения, в которой не будут использованы пластиковые элементы и все газовые линии будут металлическими. Рабочее напряжение 1800 В соответствует газовому усилению около  $5 \cdot 10^4$ . Считывание информации будет выполняться методами измерения времени дрейфа, деления заряда с резистивных анодов и пэдовым катодным считыванием.

**Установка PANDA** предназначена для изучения процессов в области адронной физики с антипротонами на ускорительном комплексе FAIR в GSI (Дармштадт). Для строу-трекера STT установки PANDA, размещенного в вакууме соленоидального магнита и выполняющего как измерение поперечного импульса частиц, так и идентификацию адронов, выбрана газовая смесь на основе  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  с 10 %-й гасящей добавкой  $\text{CO}_2$ . Используются строу длиной 1,5 м, диаметром 10 мм и с толщиной стенки 30 мкм. Анод — W/Re (97/3 %) проволока диаметром 20 мкм [57]. Для определения продольной координаты строу-детектором изучался метод времязависимой зарядовой асимметрии [58], однако был выбран вариант использования 27-слойного детектора на основе строу со считыванием только радиальной координаты, но с частью строу, наклоненных на угол  $\pm 3^\circ$  для определения продольной координаты в пучковом направлении с точностью  $\sim 4$  мм.

### 3. ПАРАМЕТРЫ КООРДИНАТНЫХ СТРОУ-ДЕТЕКТОРОВ

**3.1. Загрузочные способности.** Типичные спектры сигналов от  $\gamma$ -квантов с энергией 5,9 кэВ источника  $^{55}\text{Fe}$  для газовой смеси на основе аргона (кривая 1) и ксенона (кривая 2) представлены на рис. 13, а. Большая величина амплитуд сигналов для Xe определяется меньшим значением величины энергии, требуемой на образование электрон-ионной пары (22 эВ), по сравнению

с Ag (табл. 1). Спектры получены при газовом усилении  $10^4$ , энергетическое разрешение для аргоновой смеси равно  $\sim 19\%$ , для ксеноновой  $\sim 20,3\%$ . Зависимость энергетического разрешения этих строу в тех же условиях от интенсивности поглощенных  $\gamma$ -квантов с энергией 8 кэВ от рентгеновской трубки с медным анодом приведена на рис. 13, б, а на рис. 14 показано изменение центра тяжести спектров сигналов [59]. При облучении использовался щелевой коллиматор, расположенный ортогонально к аноду, следовательно,

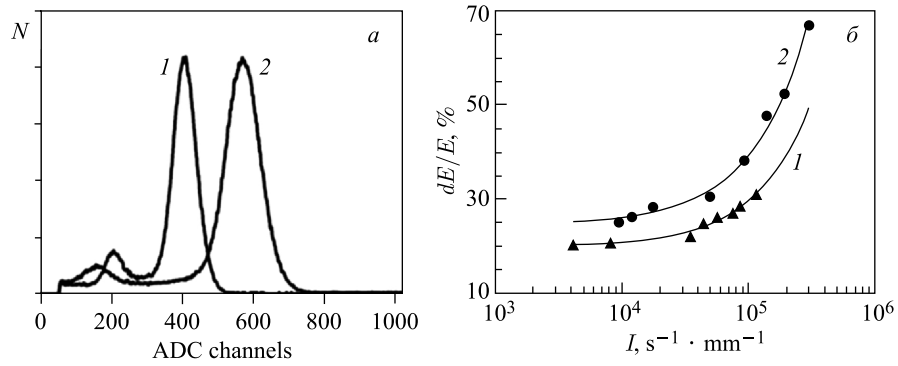


Рис. 13. а) Сигналы со строу при газовой смеси Ar/CO<sub>2</sub> (70/30%) и Xe/CO<sub>2</sub> (70/30%) — спектры 1 и 2 соответственно. Источник <sup>55</sup>Fe. б) Энергетическое разрешение в зависимости от интенсивности потока  $\gamma$ -квантов от рентгеновской трубки для газовой смеси на основе Ar ( $\blacktriangle$ ) и Xe ( $\bullet$ ). В обоих случаях строу диаметром 6 мм при газовом усилении  $10^4$

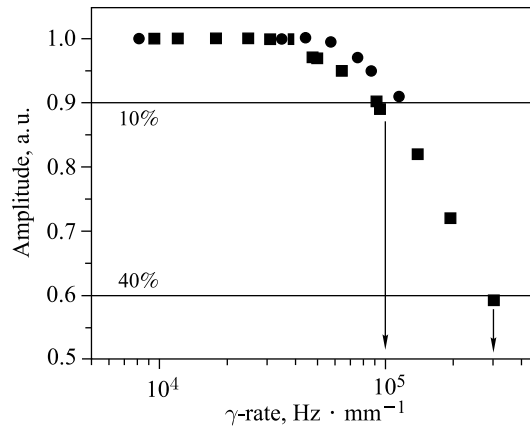


Рис. 14. Уменьшение амплитуды сигналов в зависимости от величины поглощенного потока  $\gamma$ -квантов на 1 мм длины анодной проволоки. Строу диаметром 6 мм при однородном облучении ее по ширине. Газовые смеси:  $\bullet$  — Ar/CO<sub>2</sub> (70/30%) и  $\blacksquare$  — Xe/CO<sub>2</sub>(70/30%). Газовое усиление  $10^4$  для обеих зависимостей [59]



регистрировались события со всей облучаемой площади вдоль радиуса строу. Сильное ухудшение энергетического разрешения начинается с интенсивности  $\sim 10^5 \text{ с}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$  (рис. 13, б).

Рис. 14 показывает падение амплитуды сигналов на 10 % для смеси  $\text{ArCO}_2$  при интенсивности  $\sim 1,3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  на 1 мм длины анода. Для газовой смеси  $\text{XeCO}_2$  падение на 10 % наблюдается при интенсивности  $\sim 9,2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{мм}^{-1}$ . При регистрации МIP выделяемая энергия ниже, чем в случае  $\gamma$ -квантов, следовательно, загрузочная способность увеличивается.

Высокая локальная загрузочная способность строу может быть реализована только частично уменьшением ее длины и диаметра. Первое ограничено малой востребованностью использования коротких строу, второе — сложностью создания прецизионных внутренних элементов и технологией сборки строу в режиме массового производства. Наиболее используемыми являются строу диаметром от 5 до 10 мм при длине  $< 5 \text{ м}$ .

Использование строу-детекторов для экспериментов в пучках высокой светимости ограничивается высокой «занятостью» (occupancy) детектирующих элементов из-за низкой гранулярности строу, равной произведению длины на диаметр. Занятость определяется как отношение среднего числа регистрируемых частиц к числу частиц, которые детектор способен зарегистрировать за определенный интервал времени. Типичная величина занятости детектирующих элементов трекеров, считающаяся достаточной для обеспечения высокоэффективной реконструкции треков, обычно менее 10 %. Особенности трековых систем экспериментальных установок позволяют корректировать эту величину. Например, занятость EC ATLAS TRT достигает 53 %, однако при наличии  $\sim 35$  зарегистрированных хитов на треке каждой частицы реконструкция треков осуществляется с достаточно высокой эффективностью [60, 13].

Для уменьшения занятости строу в баррельной части TRT ATLAS были разработаны трехсегментные аноды. Проволока центрального анодного сегмента была гальванически отсоединена от крайних сегментов и не являлась электродом. Следовательно, центральный сегмент не являлся чувствительным, а детектирующими элементами были только крайние части анода, к которым были подключены независимые электронные каналы считывания. В дальнейшем разработчиками была показана принципиальная возможность создания полностью чувствительной строу с трехсегментным анодом [61]. Таким образом, при анодном считывании радиальных координат возможно использовать сегментные аноды, на каждый из которых напряжение подается по индивидуальным каналам, и по ним же считываются сигналы.

Целесообразность создания высокогранулярных детекторов на основе строу определяется потребностью в детекторах, способных работать в условиях высоких загрузок с достаточно хорошим пространственным разрешением, высокой локальной загрузочной способностью и обладающих мини-

мальной радиационной толщиной, высокой радиационной стойкостью, надежностью и эксплуатационной простотой [62].

**3.2. Гранулированные строу.** Высокоэффективная реконструкция треков в экспериментах на пучках частиц с высокой светимостью или при изучении процессов с высокой множественностью требует использования гранулированных трековых детекторов, обеспечивающих низкую величину занятости индивидуальных детектирующих элементов. Использование силиконовых пэдových или стриповых детекторов, газонаполненных MPGD детекторов — таких как GEM, micromegas и их разновидности, в некоторых случаях может быть ограничено технологическими или стоимостными проблемами.

Строу-трекеры, обладающие минимальной радиационной толщиной, большим акцептансом и относительно низкой стоимостью, конкурентоспособны при применении их в больших экспериментальных установках. С целью устранения основного их недостатка — плохой гранулярности детектирующих элементов был разработан метод создания гранулированных строу с сегментными анодами, при этом их гранулярность может быть от  $1 \text{ см}^2$  [63, 64].

Для создания мультисегментных анодов были разработаны прецизионные элементы для гальванически независимого соединения соседних частей анода (сегментов). Одними из них являлись два варианта соединительных втулок на основе стеклянных капиллярных трубок, подобных используемым в ATLAS TRT. Другими являлись спейсеры, изготовленные из поликарбоната и служащие не только для соединения соседних сегментов анода, но и для обеспечения вывода контактной проволоки каждого сегмента из строу для считывания сигнала и индивидуальной подачи на сегмент анодного напряжения. Кроме того, каждый спейсер центрирует и поддерживает анод. На рис. 15 схематично показаны оба варианта соединительных втулок: один служит для соединения «концевых» частей соседних сегментов, второй — для соединения их «начальных» концов с контактными проволоками.

Конструкция поликарбонатного спейсера показана на рис. 16, а. Схематичное изображение собранного спейсерного узла, содержащего спейсер и

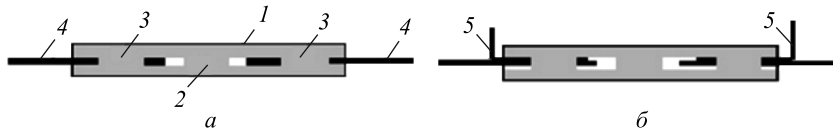


Рис. 15. Два необходимых варианта (а, б) соединительных стеклянных капиллярных трубок (1), 2 — изоляционный стеклянный зазор; 3 — локальная фиксация сегментной проволоки; 4 — сегментная проволока и 5 — дополнительная «контактная» золоченая вольфрамовая проволока диаметром 30 мкм. Контакт между проволоками 4 и 5 образуется при их запайке в капилляр, величина резистивности контакта — доли ома. Длина стеклянных капиллярных трубок 6 или 7 мм, наружный диаметр 0,25 мм и внутренний 0,1 мм. Масса капиллярных трубок 0,094 мг на 1 мм длины

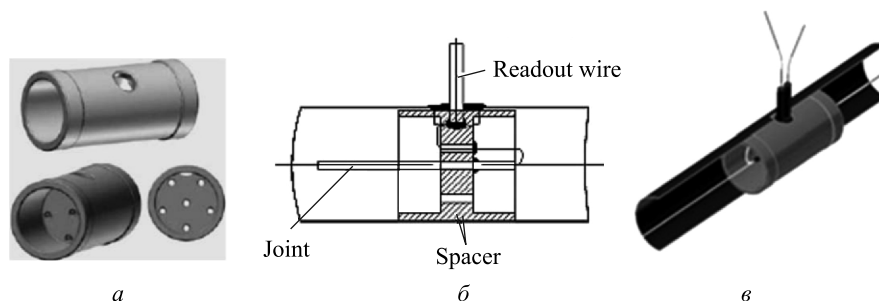


Рис. 16. Общий вид спейсера (а), схема спейсерного узла (б) и фотография спейсера внутри строу (в), показывающие принцип вывода контактных проволок двух соседних сегментов

соединительную капиллярную трубку с фиксированными в ней сегментными и контактными проволоками, представлено на рис. 16, б. Для простоты на рисунке показан спейсер с укороченной длиной и капиллярной трубкой с одной контактной проволокой. Так как грануляция по длине для строу больших диаметров технологически более простая, разработка выполнялась для строу диаметром 4 мм. На рис. 16, в показан фрагмент гранулированной строу диаметром 4 мм с находящимся внутри спейсерным узлом и выведенными наружу двумя контактными проволоками. Длина спейсерного узла составляла  $8 (-0; +0,02)$  мм, максимальный наружный диаметр —  $3,98 (+0; -0,02)$  мм.

Поликарбонатный спейсер (рис. 16, а, б) имеет внутреннюю перемычку с центральным отверстием для фиксации капиллярной трубки, расположенной вдоль оси строу. Набор отверстий используется для фиксации контактных проволок до вывода их из строу, а также для протока рабочего газа вдоль строу. Отверстие на цилиндрической поверхности спейсера при сборке строу геометрически совпадает с отверстием в ее стенке и служит для вывода контактных проволок, после чего герметизируется эпоксидным компаундом, приклеивая спейсерный узел к строу.

На рис. 17 представлен 10-сегментный анод для строу диаметром 4 мм и длиной 1,6 м. Сегменты имеют разную длину от 50 до 250 мм, что соответствует гранулярности от 2 до 10 см<sup>2</sup>. Считывание сигналов и подача напряжения на 1-й и 10-й сегменты осуществляются через концевые втулки. Для сегментов 3–9 использовались специально разработанные плоские кабели на основе каптоновой пленки, обладающие минимальным количеством собственного вещества и длиной до 1,6 м [33, 65]. Использование разработанных кабелей с выводом регистрируемых аналоговых сигналов на обе стороны строу позволяет считывать информацию со строу длиной до  $\sim 4$  м. При этом нет существенного увеличения радиационной толщины строу-детектора.

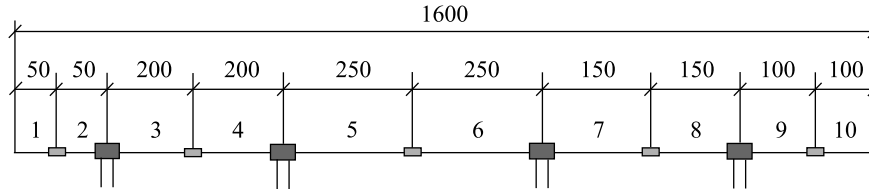


Рис. 17. Многосегментный анод длиной 1,6 м с 10 сегментами длиной от 5 см (1, 2) до 25 см (5, 6). Мультианод содержит пять стеклянных соединительных капиллярных трубок и четыре сегментных узла

Прототип гранулированного координатного детектора, содержащий 360 каналов регистрации, был разработан и создан на основе строу диаметром 4 мм с сегментными анодами. Гранулярность прототипа составляла  $4 \text{ см}^2$ , газовая смесь была  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  (80/20 %), исследования проводились на стенде и адронном пучке канала Н6 SPS в ЦЕРН [66–68]. Результаты показали тождественность временных и пространственных параметров прототипа в сравнении с традиционными строу-детекторами. Пространственное разрешение ( $\sigma$ ) было около 170 мкм при эффективности  $\sim 90\%$ , определяемой маленькой толщиной слоя газа в строу. Нечувствительная площадь из-за наличия внутренних элементов в строу составляла менее 5% от полной чувствительной площади прототипа. Считывающая сигналы со всех анодных сегментов электроника размещалась у концов строу с одной их стороны, что указывает на отсутствие ограничения из-за ее плотности на гранулярность до  $2 \text{ см}^2$ . Подача напряжения на каждый сегмент и передача с него сигналов осуществлялась по одной шине специализированных низкоомных плоских кабелей, мало влияющих на количество вещества прототипа на пути частиц.

Стендовые и пучковые исследования прототипа показали возможность создания гранулированных строу-детекторов в режиме их массового производства.

**3.3. Пространственное разрешение.** Точность измерений радиальных координат определяется точностью временных измерений дрейфа ближайших к аноду электронов, образованных в результате ионизации регистрируемой заряженной частицей. При этом важнейшим фактором, влияющим на точность, является время нарастания переднего фронта импульса, а также отношение сигнал/шум и собственный джиттер временного распределения, определяемый выражением [41]

$$\sigma_t \approx \frac{t_r}{S/N},$$

где  $\sigma_t$  — rms шумов  $N$ ;  $t_r$  — время нарастания переднего фронта сигнала  $S$ . На рис. 18 показано пространственное разрешение при регистрации МПР в

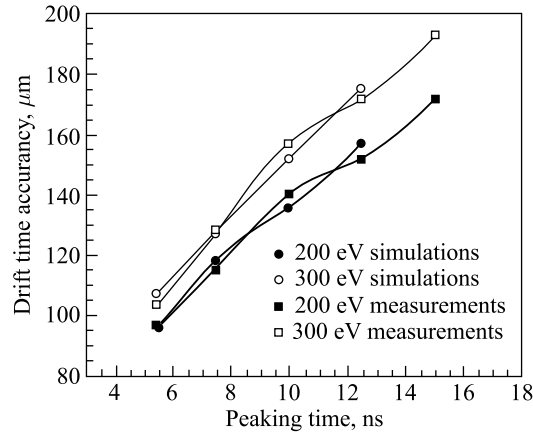


Рис. 18. Точность временных измерений как функция «peaking time» для различных порогов регистрирующей электроники

зависимости от величины «peaking time» — наклона переднего фронта от 1 до 100 % максимальной величины импульса. Результаты моделирования и пучковых измерений для строу диаметром 4 мм и газовой смеси  $\text{Xe}/\text{CF}_4/\text{CO}_2$  (70/20/10 %) для регистрирующей электроники с порогом 200 и 300 эВ показывают, что с увеличением «peaking time» от  $\sim 5,5$  до  $\sim 12$  нс разрешение ухудшается от  $\sim 90$  до  $\sim 170$  мкм [69]. Эффективность 4-мм строу при этом возрастала от  $\sim 74$  % и выходит на плато на уровне  $\sim 85$  % при «peaking time»  $\geq 9$  нс.

Строу каждого слоя двухслойной строу-камеры могут быть склеены друг с другом с зазором между их стенками  $\delta \approx 20$  мкм или закреплены в отверстиях рамы, в этом случае величина  $\delta$  увеличивается и превышает толщину стенок строу  $\varepsilon$ . Нечувствительный промежуток между соседними строу равен  $2\varepsilon + \delta$ .

Радиальное разрешение строу диаметром 4 мм с газовой смесью  $\text{Xe}/\text{CO}_2/\text{O}_2$  (70/27/3 %) для регистрации МПР для двух величин загрузки показано на рис. 19. Регистрирующая электроника имеет низкий порог регистрации, соответствующий  $\sim 300$  эВ при эффективности регистрации 85 %. Разрешение ухудшается от 110 до 130 мкм при увеличении загрузки от минимальной ее величины до 900 кГц/см длины анода. Загрузка 90 кГц/мм длины строу диаметром 4 мм соответствует загрузке  $\sim 60$  кГц/мм для строу диаметром 6 мм. Как видно из рис. 14, для ксеноновых смесей при такой загрузке начинается уменьшение амплитуд сигналов, что и вызывает ухудшение разрешения. Радиальное разрешение этих же строу для смеси  $\text{ArCO}_2$  было 187 мкм при эффективности регистрации 78 %.

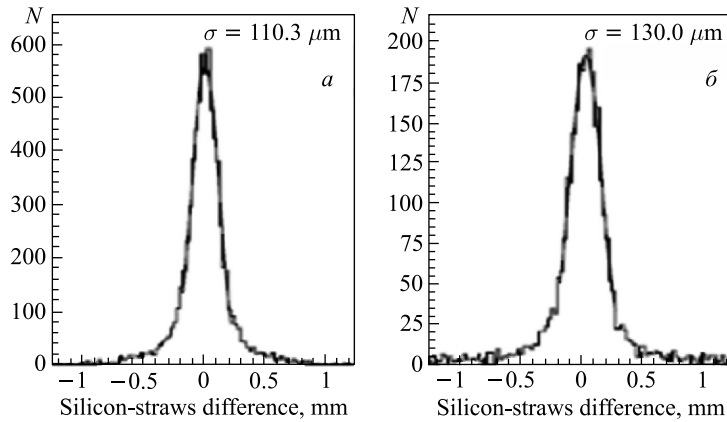


Рис. 19. Радиальное разрешение (residual) строу TRT ЕС для различной загрузки:  $\sim 0$  кГц/см (а) и 900 кГц/см (б). Газовая смесь Xe/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>(87/20/3 %) [60]

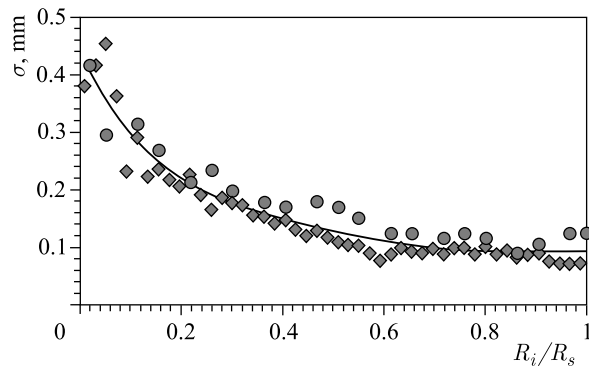


Рис. 20. Пространственное разрешение вдоль радиуса строу ( $R_s$ ) диаметром 4 мм (●) и 9,53 мм (◆). По оси абсцисс отложено отношение расстояния точек от анода к радиусу строу. Газовая смесь Ar/CO<sub>2</sub> (80/20 %) [43]

Измерения пространственного разрешения строу диаметром 4 и 9,53 мм для МПР были выполнены на тестовом пучке SPS в ЦЕРН, при этом использовался Si-пэдовый пучковый телескоп EUDET с трековой точностью лучше 5 мкм [70, 71]. Строу продувались газовой смесью Ar/CO<sub>2</sub> (80/20 %). Газовое усиление строу диаметром 9,53 мм составляло  $\sim 8 \cdot 10^4$  и было на  $\sim 20\%$  меньше, чем в строу диаметром 4 мм. На рис. 20 показаны распределения пространственного разрешения вдоль радиуса этих строу. Ромбы соответствуют строу диаметром 9,53 мм, а кружки — диаметром 4 мм. Сред-

няя величина пространственного разрешения вдоль радиуса этих строу составляет  $\sim 180$  и  $\sim 190$  мкм соответственно, тогда как неоднородность пространственного разрешения вдоль радиуса строу изменяется от  $\sim 450$  мкм вблизи анода до  $\sim 90$  мкм вблизи катода. Характер этих зависимостей, определяемый распределением напряженности электрического поля вдоль радиуса строу в его относительных значениях, достаточно близок для строу с диаметрами от 4 до 10 мм при близких величинах их газового усиления. Так, полученные значения описаны общим полиномом 5-й степени,  $\chi^2$  которого равен 0,9445.

Использование этих зависимостей при реконструкции треков частиц в процессе преобразования измеряемых временных интервалов в радиальные координаты может обеспечить более точное определение параметров треков. Кроме того, при этом отпадает необходимость коррекции возможной неоднородности скорости дрейфа по радиусу строу.

В идеальном случае пространственное разрешение двухслойной камеры определяется выражением  $\delta^{-2} = \delta_1^{-2} + \delta_2^{-2}$ , где значения  $\delta_1$  и  $\delta_2$  — пространственное разрешение строу соответствующих слоев. На рис. 21 показано пространственное разрешение двухслойной камеры в зависимости от точки пересечения радиуса строу первого слоя в его анодной плоскости частицами с различными углами входа. Рассматривалась камера со строу с внутренним диаметром 9,53 мм,  $\varepsilon$  — 70 мкм, зазор  $\delta$  между стенками соседних строу  $\sim 20$  мкм. Сдвиг между двумя слоями составлял 4,9 мм. Расстояние между анодными плоскостями слоев было равно 10,6 мм. Кривые указывают на высокую однородность пространственного разрешения для углов входа частиц

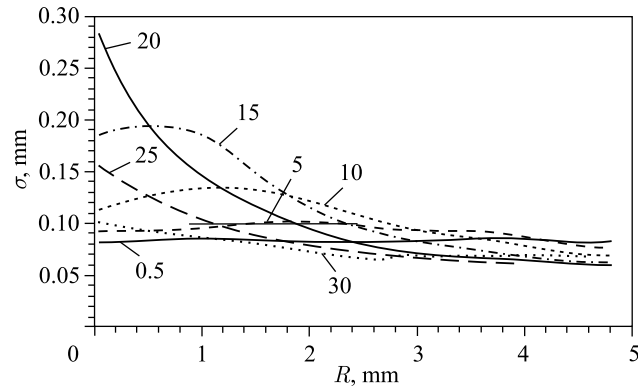


Рис. 21. Пространственное разрешение двухслойной камеры вдоль радиуса строу первого слоя для пересекающих строу частиц с различными углами входа (использовалась показанная на рис. 20 зависимость) [43]. Значения углов входа частиц показаны на кривых

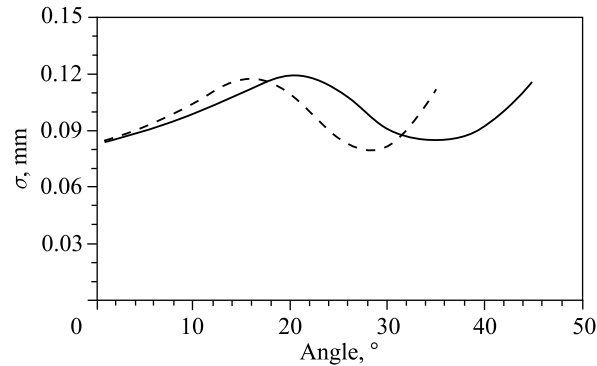


Рис. 22. Среднее значение пространственного разрешения двухслойной камеры в зависимости от угла входа частиц [43]. Штриховая и сплошная линии — для расстояния между анодными плоскостями двухслойной камеры 10,6 и 13,7 мм соответственно

менее  $10^\circ$  от нормального направления к плоскости камеры и его ухудшение при увеличении угла входа. Таким образом, величина среднего значения пространственного разрешения камеры в широком диапазоне углов входа частиц в детектор менее 120 мкм (рис. 22).

**3.4. Катодное считывание.** Возможность детекторов, имеющих высокую локальную загрузочную способность, работать при более высоких потоках частиц и получать двухкоординатную информацию реализовывалась для МПК и ДК методами катодного считывания. Примерами этого являются широко используемые стриповые и пэдовые ДК [72–74]. В отличие от проволочных камер с катодным считыванием считывающие электроды в строу-камерах должны располагаться после проводящих катодов. Возможности катодного считывания со строу были показаны ранее, например, на прототипе с алюминизированными майларовыми трубками, в каждой из которых в катоде параллельно аноду была продольная полоса без Al-покрытия [45, 46]. Электрод с ортогональными аноду считывающими стрипами накладывался на прозрачные для индукционного заряда полосы. Было показано, что измерения позиции лавины методом центриды и методом отношения величин зарядов, наводимых на три стрипа, при низком отношении сигнал/шум несколько лучше для второго метода, а при высоком отношении — для первого. Для строу, имеющих прозрачные для индукционных зарядов катоды [75] с резистивностью более 100 кОм/квadrat, можно использовать внешние пэдовые или стриповые считывающие электроды. Например, это могут быть соосные двухтрубчатые строу (рис. 23), у которых внутренние трубки имеют прозрачные резистивные катоды, а внешние содержат кольцевые пэды для считывания информации о продольной координате. Координата в ортогональном к строу направлении определялась по центру тяжести с трех стрипов соотно-



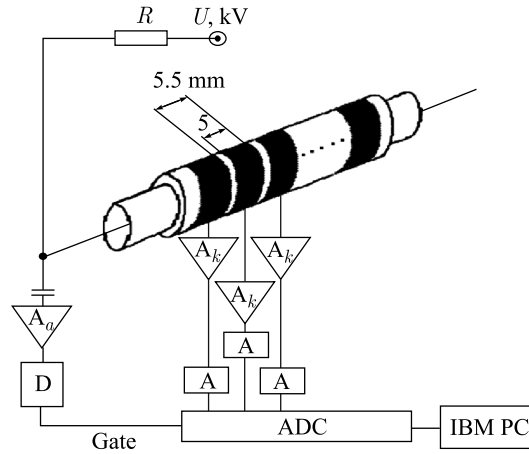


Рис. 23. Схема считывания сигналов с кольцевых пэдов шириной 5 мм и шагом 5,5 мм для строу диаметром 10 мм.  $A_a$  — анодный усилитель;  $A_k$  — катодные усилители; А — дополнительные усилители для катодного считывания; D — дискриминатор и ADC — АЦП

шением [76–78]

$$X = \frac{h(Q_L - Q_R)}{Q_L - Q_V - Q_R},$$

где  $h$  — шаг стрипов;  $Q_L$ ,  $Q_M$ ,  $Q_R$  — наведенные лавиной заряды на левый, центральный и правый стрипы соответственно. Внутренний диаметр строу равен 10 мм, ширина стрипов 5 мм и шаг стрипов 5,5 мм. Регистрировались  $\gamma$ -кванты от источника  $^{55}\text{Fe}$ . При максимальном газовом усилении пространственное разрешение вдоль стрипа изменялось от  $\sim 70$  до 100 мкм (рис. 24, а) [77]. На рис. 24, б показана зависимость средней величины разрешения от анодного напряжения.

Рассматривались оригинальные модификации строу со стриповыми катодами [79], но их реализация из-за низкого отношения сигнал/шум, скорее всего, может быть востребована для частных задач при больших потерях энергии на ионизацию.

Большой объем R&D был выполнен в рамках проектов МЕСО и МЕСО/Mu2e. Выполнено моделирование строу с резистивными катодами, реализовано считывание сигналов со строу с резистивностью катодов от 0,5 до нескольких МОм/квadrat, разработаны каптоновые пленки с требуемыми электрическими и механическими параметрами при неоднородности резистивности менее  $\pm 15\%$ , созданы и исследованы бесшовные тонкостенные строу, в том числе методом экструзии из материала РЕЕК (Осака, Япония) [29], получен опыт считывания катодных пэдовых сигналов.

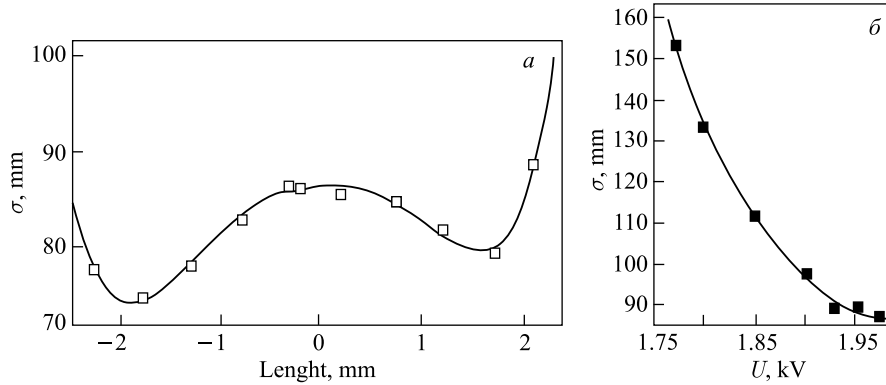


Рис. 24. *а*) Зависимость пространственного разрешения  $\sigma$  вдоль кольцевого стрипа шириной 5 мм и шагом 5,5 мм. Регистрировались  $\gamma$ -кванты от узкоколлимированного источника  $^{55}\text{Fe}$ . Струй диаметром 10 мм, резистивность катода 100 кОм/см<sup>2</sup>. Газ Ar/CH<sub>4</sub> (50/50%), анодное напряжение 1,97 кВ. *б*) Зависимость средней величины пространственного разрешения от величины анодного напряжения

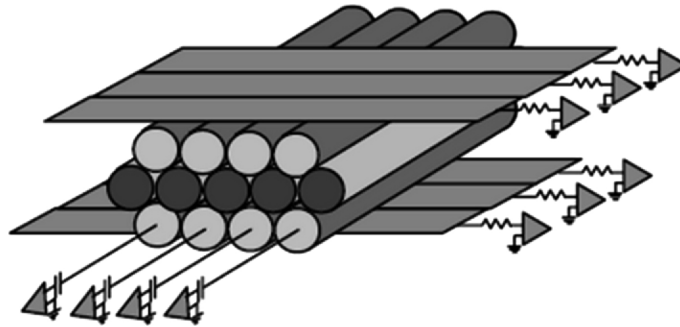


Рис. 25. Расположение трех слоев струй в L-трекере. Все струи длиной 2,9 м параллельны оси соленоидального магнита, считывающие стрипы шириной 4 мм и шагом 5 мм расположены ортогонально оси струй

L-трекер установки МЕСО/Mu2e содержит 912 струй только с анодным считыванием и 1824 струй с высокорезистивными катодами для считывания с 16 640 стрипов. Трекер состоит из трех слоев струй, расположенных параллельно оси соленоидального магнита, схематично показанных на рис. 25. Центральный слой служит для определения координат  $r$ ,  $\phi$  с точностью 0,2 мм, два внешних слоя с расположенными над ними считывающими стриповыми электродами — для измерения  $z$ -координат методом катодного считывания. Амплитудная информация с соседних 3 или 5 стрипов служит для определения центроиды, и точность определения координат будет 1,5 мм.

Каждая строу с катодным считыванием имеет длину 2,9 м и состоит из трех коротких строу, изготовленных методом экструзии. Для анодов используется проволока диаметром 25 мкм из золоченого вольфрама с 3 %-ой добавкой Re.

**3.5. Продольное считывание.** *3.5.1. Метод деления заряда.* В планарных строу-детекторах для получения второй координаты заряженных частиц используются дополнительные детектирующие плоскости с наклоненными на определенный угол строу. Для цилиндрического детектора это невозможно из-за существенного увеличения толщины при установке слоя с наклоненными под углом к его оси строу. В ряде случаев полезно измерение второй координаты, например, детекторы нейтральных частиц, представляющие интерес для прикладных исследований, должны иметь двухкоординатное считывание с каждой строу, при этом точность второй координаты может быть ниже, чем радиальной.

Для определения продольных координат с дрейфовых трубок традиционно используется метод деления зарядов (МДЗ; Charge-Division Technique) с регистрацией сигналов с двух концов резистивного анода трубки [19, 80]. Метод деления зарядов обладает невысоким продольным разрешением, быстро ухудшающимся с увеличением длины дрейфовых трубок, особенно при регистрации МIP, что определяется ухудшением отношения сигнал/шум при прохождении импульсов по высокорезистивному аноду. Необходимость увеличения времени сбора заряда из-за требований к регистрирующей электронике уменьшает быстродействие, что также ограничивает использование метода для ускорительных экспериментов.

Принцип МДЗ основан на сравнении величин сигналов, проходящих разный путь по анодной проволоке от точки образования лавины к ее концам. Используются проволоки с резистивностью от  $\sim 0,5$  кОм/м до нескольких МОм/м с низкой нелинейностью, например, типа Stablohm (California Fine Wire Co.). Для строу с измерением продольной координаты методом деления заряда в Т-трекере установки МЕСО/Mu2e используется проволока диаметром 33 мкм типа Stablohm 800 (SS) с резистивностью более 14 кОм/м и нелинейностью менее 1 %, длина проволоки не превышает 1 м. Используется газовая смесь  $\text{CF}_4/\text{C}_4\text{H}_{10}$  в соотношении 80/20, газовое усиление около  $5 \cdot 10^4$ .

Лучшие результаты для достаточно длинных строу были получены методом деления зарядов в сочетании с методом времязависимой зарядовой асимметрии при выполнении R&D в рамках проекта PANDA [58, 80]. Изучалось продольное считывание со строу диаметром 6 и 8 мм при длине строу 1,55 м и газовой смеси  $\text{Ar} + 10\% \text{CO}_2$ . Рассматривалась W/Re (97/3 %) проволока диаметром 20 мкм и с резистивностью  $(260 \pm 10)$  Ом/м в качестве анода. Для увеличения резистивности и обеспечения требуемого более высокого натяжения анода она была заменена на вольфрамовую проволоку с 18 % Re, обладавшую пределом пластической деформации около 110 г и резистивностью  $(400 \pm 15)$  Ом/м. Повышение резистивности увеличивает асимметрию

и улучшает в данном случае продольное разрешение проходящих по аноду различных путей сигналов. Для  $\gamma$ -квантов от источника  $^{55}\text{Fe}$  продольное разрешение  $\sigma$  в середине и у концов анода было  $\sim 1,9$  и  $\sim 3,1$  см соответственно, а для МПР — 2,5 и 6,2 см. Сильное различие величин продольного разрешения для  $\gamma$ -квантов с фиксированными ионизационными потерями и для МПР с флуктуирующими ионизационными потерями характерно для МДЗ.

**3.5.2. Метод прямого временного измерения.** Возможность определения продольной координаты методом измерения разности времени прихода сигналов на два конца дрейфовых трубок, так называемым методом прямого временного измерения (DTM), была показана ранее [36]. Если точка образования лавины смещена на величину  $\delta L$  от середины анода длиной  $L$ , то проходимые сигналами расстояния к двум концам анода равны  $L/2 \pm \delta L$ . Следовательно, разность времени прихода сигналов определяет продольную координату от центра строу выражением  $\delta t = \pm 2\delta v$ , где знак указывает направление смещения от центра. Величина  $v$ , обратная скорости прохождения сигнала по аноду, равна 3,49 нс/м [81].

Измерение разности времени прихода коррелированных сигналов  $\delta t$  проводилось по алгоритму, схематично представленному на рис. 26. Коррелированные импульсы отбирались введением порога  $T_{\min}$  на поступающие анодные импульсы и для МПР наличием триггерного сигнала. После аппроксимации фронта импульсов по точкам между верхним  $T_t$  и нижним  $T_b$  уровнями определялись времена прихода каждого импульса ( $t_1$  и  $t_2$ ) по пересечению аппроксимирующих прямых с временной осью в единицах тактового генератора. Затем значения  $\delta t$  разницы временной задержки импульсов ( $t_1 - t_2$ ) гистограммировались, и вычислялось среднее значение спектра и  $\sigma$ .

Изучалось продольное считывание для строу диаметром 9,53 мм и длиной 2 м, продуваемой газовой смесью  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  (80/20 %). Анодом являлась проволока диаметром 30 мкм с сопротивлением 70 Ом/м, а волновое сопротивление строу было около 360 Ом. Регистрировались  $\gamma$ -кванты от источ-

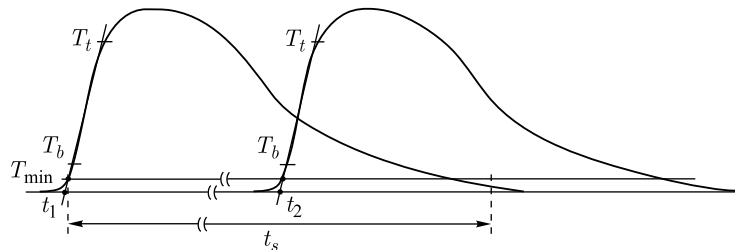


Рис. 26. Схематичное представление измерения разности времени прихода коррелированных сигналов  $\delta t$ .  $t_s$  — программное временное окно для коррелированных сигналов;  $T_{\min}$  — уровень отсечки шумов;  $T_t$  и  $T_b$  — верхний и нижний пороговые уровни;  $t_1$  и  $t_2$  — время прихода импульсов

ника  $^{55}\text{Fe}$  или электроны с энергией 3,55 МэВ от источника  $^{106}\text{Ru}$ . Сигналы, проходя по аноду, поступали на идентичные усилители и далее в два канала амплитудно-цифрового преобразователя (АЦП) устройства DRS4, оцифровывающего их с частотой 2 или 5 ГГц [70]. Информация об амплитуде и форме импульсов передавалась далее в компьютер.

Метод прямого временного измерения требует высокой точности измерения временных интервалов. Например, при определении радиальных координат расстоянию 0,1 мм соответствует временной интервал  $\sim 2$  нс, тогда как в методе прямого временного измерения расстоянию 0,1 мм соответствует временной интервал  $\sim 0,7$  пс. Изучение формы сигналов как от  $\gamma$ -квантов, так и от электронов указывает на необходимость хорошего согласования строу с регистрирующей электроникой. При недостаточном согласовании в результате суперпозиции сигналов с отраженными импульсами от концов строу возможны изменения формы проходящих по аноду импульсов, что может влиять на значения  $\delta t$ . Регистрируемые на разных концах строу сигналы проходят по аноду различный путь, что вызывает изменения наклона их передних фронтов в зависимости от расстояния между точкой образования лавины и серединой анода. При удалении источника от середины трубки на 10–15 см эти изменения незначительны, но с увеличением расстояния существенно возрастают.

Следовательно, для получения правильных значений продольного разрешения необходима калибровка параметров для введения поправочных коэффициентов. После выполнения калибровки были получены поправочные

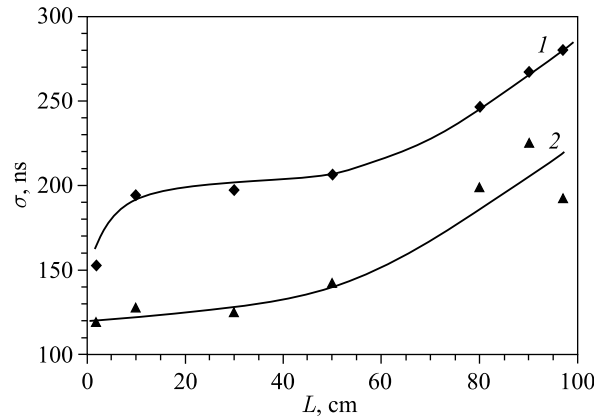


Рис. 27. Продольное разрешение строу в зависимости от расстояния источника  $^{106}\text{Ru}$  от центра строу. Газовое усиление строу около  $8 \cdot 10^4$ . 1 — разрешение  $\sigma$ , полученное без поправочных коэффициентов; 2 — разрешение  $\sigma$ , полученное с учетом поправочных коэффициентов. Соотношение между продольным разрешением во временных и линейных единицах: расстоянию 1 см соответствует время, равное 86,9 пс

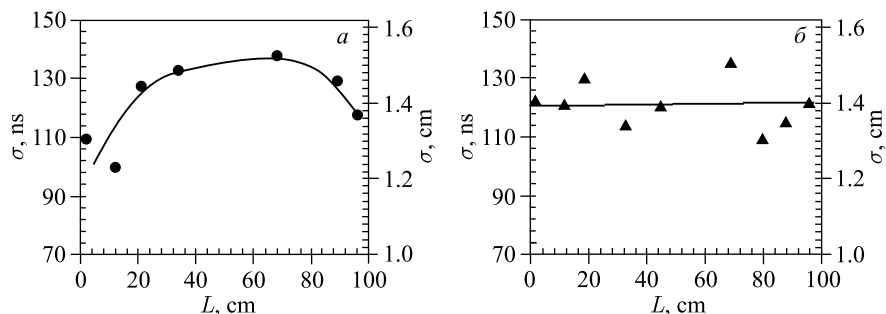


Рис. 28. Предельное продольное разрешение метода: а) источник  $^{55}\text{Fe}$ , газовое усиление  $6 \cdot 10^4$ ; б) источник  $^{106}\text{Ru}$ , газовое усиление  $8 \cdot 10^4$

коэффициенты, практически совпадающие при регистрации как  $\gamma$ -квантов, так и МПР.

Продольное разрешение строу длиной 2 м, показанное кривой 2 на рис. 27, изменяется от 1,4 см до менее чем 2,1 см для 80 % длины строу и до 2,6 см на полной ее длине. Измерения, выполненные для оценки предельных возможностей метода прямого временного измерения при определении продольных координат вдоль дрейфовых трубок, представлены на рис. 28. Видно, что как для  $\gamma$ -квантов, так и для МПР продольное разрешение вдоль строу во временных единицах находится в диапазоне от  $\sim 100$  до  $\sim 130$  пс или в линейных от  $\sim 1,3$  до  $\sim 1,5$  см [82]. Использование поправочных коэффициентов позволяет применять метод прямого временного измерения для определения продольных координат с хорошей точностью дрейфовыми трубками больших длин.

#### 4. СТРОУ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО ГАЗОВОГО НАПОЛНЕНИЯ

**4.1. Механические характеристики.** Типичное пространственное разрешение МПК и ДК обычно 200–300 мкм [12], что не всегда является достаточной величиной. Уменьшение диффузии электронов на пути к аноду при повышении давления газа  $P$  приводит в соответствии с выражением  $\sigma = P^{-1/2}$  к улучшению разрешения. Например, лучшее полученное разрешение ДК было 60 мкм при давлении 1 бар [83], а в работе [84] было показано разрешение 30 мкм для газовой смеси  $\text{ArC}_2\text{H}_6$  в камере Mark-3 при давлении 4 бар. Но если повышение давления планарных ДК по техническим причинам проблематично, то для состоящих из набора строу детекторов это возможно даже для длинных трубок, т. е. для детекторов с большим аксептансом. Трековые де-

детекторы на основе строу работают в вакууме [19, 85, 86] и способны работать при высоком давлении их газового наполнения.

Известно, что при увеличении дифференциального давления газового наполнения строу изменяются их линейные размеры [86, 87] в соответствии с выражением

$$\varepsilon = PR(1 - 2\nu)/2dE,$$

где  $P$  — дифференциальное давление газового наполнения;  $E$  — модуль Юнга пленки и  $\nu$  — коэффициент Пуассона. Так, относительное удлинение  $\varepsilon$  строу радиусом  $R$ , равным 0,5 см, из майлара толщиной  $d = 30$  мкм при давлении 1 бар составляет  $6,3 \cdot 10^{-4}$ .

Для исследования параметров строу в зависимости от давления газового наполнения использовались симметричные строу, аналогичные используемым в строу-трекере COMPASS, намотанные двумя каптоновыми стрипами: внешний стрип из 12 мкм алюминизированной каптоновой пленки типа HN50 и внутренний — из 40 мкм проводящей пленки типа XC-160.

Для строу длиной 1,55 м, с внутренним диаметром 9,53 мм и наружным  $\sim 9,67$  мм определялись изменения их диаметра и длины при дифференциальном давлении до 4 бар. Рис. 29 показывает, что при повышении дифференциального давления до 1 бар диаметр строу увеличивается на  $\sim 180$  мкм, при дальнейшем повышении давления увеличение диаметра происходит практически линейно и для давления 4 бар составляет величину  $\sim 0,3$  мм. Удлинение свободно лежащей строу происходит с разворотом ее концов на некоторый угол, что объясняется спиралевидностью ее намотки. Удлинение составляет  $\sim 400$  мкм/м/бар, что для закрепленной в концах строу будет приводить к ее изгибу (рис. 30).

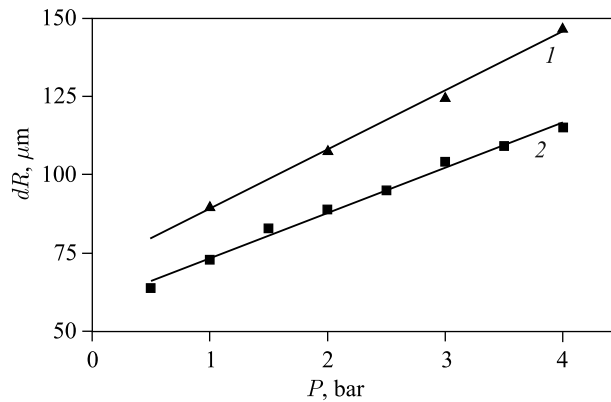


Рис. 29. Изменение радиуса строу в зависимости от дифференциального давления газового наполнения.  $\blacktriangle$ , 1 — обычная строу;  $\blacksquare$ , 2 — строу, усиленная карбоновыми нитями

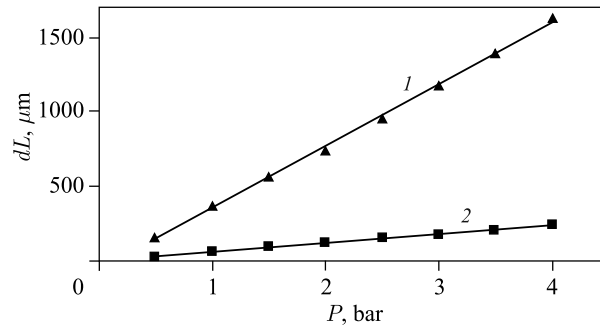


Рис. 30. Удлинение строу в зависимости от дифференциального давления газового наполнения. ▲, 1 — строу без усиливающих ее стрипов; ■, 2 — строу со стрипами. Длина строу 1,55 м

Возможны различные методы компенсации этого удлинения, например, наклеиванием на их поверхности продольных углеродных нитей, как было сделано для строу ATLAS TRT. Кривые 2 на рис. 29 и 30 показывают изменения диаметра и длины строу, усиленных четырьмя карбоновыми нитями с угловым расстоянием между ними  $90^\circ$ . Нить содержит 1000 волокон диаметром 8 мкм. Изменение радиуса строу с ростом дифференциального давления несколько уменьшается, тогда как удлинение строу уменьшается почти на порядок до величины  $\sim 60$  мкм/м/бар. Можно ожидать улучшения этой величины в результате совершенствования технологии процедуры усиления строу.

После повышения дифференциального давления до постоянной величины 1 и 4 бар наблюдается дополнительное удлинение строу (текучесть) в первые 2–3 ч с последующим слабым удлинением и выходом на плато (рис. 31).

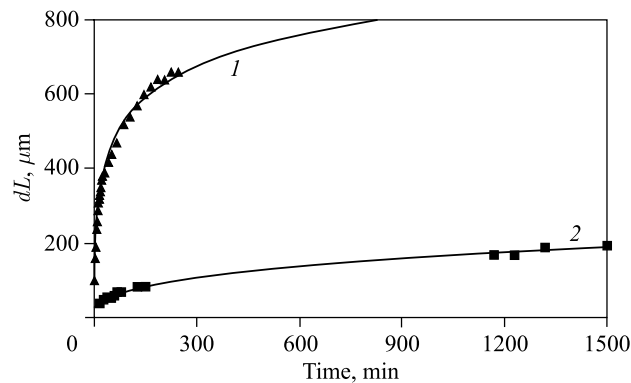


Рис. 31. Изменение длины строу в зависимости от времени нахождения при фиксированном давлении: при дифференциальном давлении 4 бар (▲, 1) и 1 бар (■, 2). Начальная длина строу 1,55 м



После снятия давления первоначальная длина строу восстанавливается. Нерифорсированные строу позволяют многократные изменения их внутреннего дифференциального давления, при их рефорсировании можно ожидать существенного увеличения многократности.

**4.2. Газовые потери.** Потери рабочего газа в строу высокого дифференциального давления могут происходить как из-за недостаточной герметизации их при сборке, так и в результате диффузного прохождения газа через пленочную стенку. Последнее определяется газовой проницаемостью стенки, т. е. их конструкцией и материалами. Различие газовой проницаемости для компонентов газовой смеси определяет минимально требуемый поток смеси через детектор, обеспечивающий постоянство соотношения парциального давления ее компонентов.

Для трех видов наиболее используемых газов измерялось изменение их давления со временем при наполнении нерифорсированной строу с герметично закрытыми торцами до дифференциального давления 4 бар (рис. 32). Собственные параметры исследуемых газов (Ar, CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>) близки; так, их отношение молекулярный диаметр/парциальный молярный объем равно 3,465/40, 3,796/44 и 3,897/43,8 Å/см<sup>3</sup> соответственно [88]. Измерения показали, что изменение внутреннего давления составляет 2,18, 3,46 и 6,69 мбар/ч на 1 м длины исследуемой строу для Ar, CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> соответственно. Коэффициент газовой проницаемости  $H$  (см<sup>2</sup>/с·бар) может быть оценен по формуле [89, 90]

$$H = qd/AT(P_1 - P_2),$$

где  $q$  — количество прошедшего через стенку газа (см<sup>3</sup>) за время  $T$  (с);  $P_1$  и  $P_2$  — давление на внутренней и внешней сторонах стенки строу (бар);  $A$  — площадь стенки (см<sup>2</sup>) и  $d$  — ее толщина (см). Отсюда следует, что среднее значение  $\log H$  для строу данной конструкции при дифференциальном

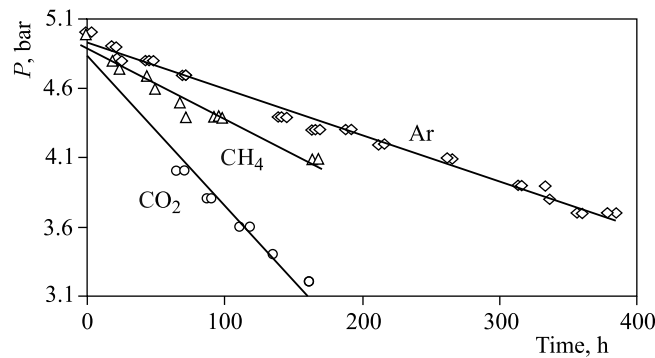


Рис. 32. Изменение давления со временем в строу длиной 1,55 м для различного газового наполнения

давлении 4 бар равно  $-9,64$ ,  $-9,44$  и  $-9,15$   $\text{см}^2/\text{с} \cdot \text{бар}$  для  $\text{Ar}$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  соответственно.

Таким образом, потери рабочего газа в детекторах на основе строу высокого давления при хорошей герметизации торцов строу могут быть небольшими. Так, для двухслойного детектора с чувствительной площадью  $1 \text{ м}^2$  потери  $\text{Ar}$  через стенки подобной строу при абсолютном давлении 5 бар составят  $\sim 0,8$  л/сут.

**4.3. Сравнительные параметры в рабочем диапазоне давления.** На рис. 33 приведены некоторые результаты исследования параметров строу диаметром 9,53 мм при изменении абсолютного давления газовой смеси  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  (80/20 %) от 1 до 3 бар с шагом 0,5 бар [91]. Строу облучались  $\gamma$ -квантами от источника  $^{55}\text{Fe}$ . Показаны величины сигналов в относительных единицах (сплошные линии) и энергетического разрешения (штриховые линии) в зависимости от анодного напряжения. С увеличением давления энергетическое разрешение ухудшается, пунктирная кривая ограничивает амплитуды сигналов на его уровне 40%. На этом уровне энергетического разрешения для строу с анодами диаметром 30 мкм и выбранной газовой смесью при повышении абсолютного давления от 1 бар до 1,5 и 3 бар величины сигналов уменьшаются более чем в 2 и 5 раз соответственно. Таким образом, с повышением давления ухудшается энергетическое разрешение и уменьшается рабочий диапазон в режиме пропорционального усиления.

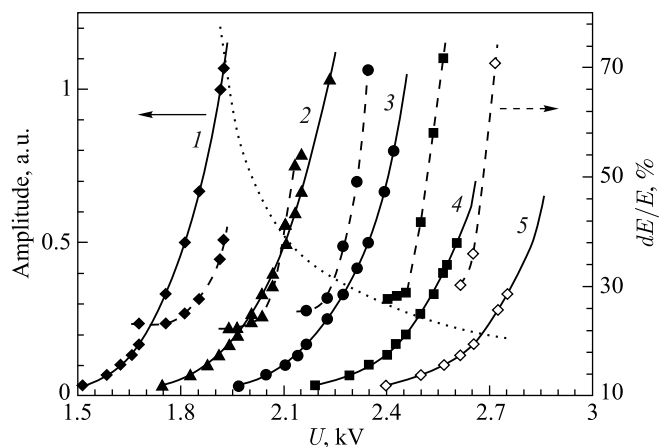


Рис. 33. Величины сигналов в относительных единицах (сплошные линии) от  $\gamma$ -квантов с энергией 5,9 кэВ и энергетическое разрешение (штриховые) в зависимости от анодного напряжения. Пунктирная кривая ограничивает величины сигналов, ниже этой линии энергетическое разрешение лучше 40%. Пары кривых от 1 до 5 получены при абсолютном давлении газовой смеси 1, 1,5, 2, 2,5 и 3 бар соответственно

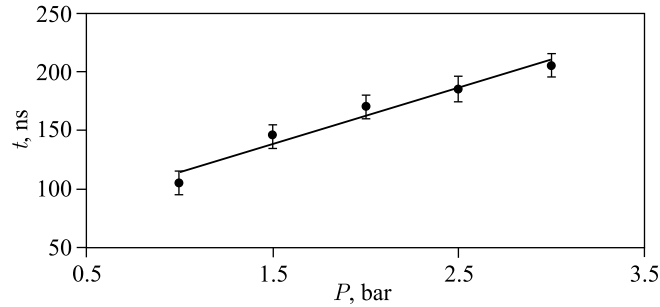


Рис. 34. Полное время сбора электронов ионизации в строу с внутренним диаметром 9,53 мм при нормальном давлении и с газовой смесью Ar/CO<sub>2</sub> (80/20%) в зависимости от величины абсолютного давления газа

Полное время сбора электронов ионизации при изменении абсолютного давления от 1 до 3 бар в строу диаметром около 10 мм увеличивается от  $\sim 100$  до  $\sim 200$  нс (рис. 34), а при 5 бар составляет  $\sim 285$  нс.

**4.4. Пространственное разрешение.** Пространственное разрешение строу высокого давления изучалось на адронном пучке канала H6 SPS (ЦЕРН) [92, 93] на небольшом двухслойном прототипе со строу, аналогичными описанным в п. 4.1, длиной 11,5 см. Строу с анодами  $\varnothing 31$  мкм были рефорсированы углеродными нитями, и зазор между соседними строу в слое был 0,52 мм. Абсолютное давление газовой смеси Ar/CO<sub>2</sub> (80/20%) изменялось от 1 до 5 бар. Прототип размещался в центре телескопа EUEDET между Si-пиксельными плоскостями. Чувствительный размер телескопа EUEDET  $6 \times 6$  мм и точность реконструкции треков 5 мкм.

Рис. 35 показывает R–T-зависимость для двух строу первого (вверху) и одной строу второго (внизу) слоев прототипа. Анодное напряжение было 3,05 кВ, абсолютное давление 3 бар и порог дискриминаторов регистрирующей электроники  $\sim 4,5$  фКл. Эффективность регистрации составляла 99%. Видна неоднородность интенсивности пучка вдоль радиуса строу: максимальная интенсивность для строу 2 и 3 была возле анода и катода соответственно. Полученные при тех же рабочих условиях распределения отклонений хитов этих строу от треков пиксельного телескопа показали, что величины пространственного разрешения ( $\sigma$ ) 2-й и 3-й строу составляют 43 и 32 мкм. Эти величины в первом случае ухудшены, а во втором улучшены из-за различного вклада хитов из анодной или катодной области.

Изменение пространственного разрешения вдоль радиуса строу при давлении 1 и 3 бар для анодного напряжения 3,05 кВ показано на рис. 36. Сильное ухудшение разрешения наблюдается в области  $\sim 2,5$  и  $\sim 1,5$  мм вокруг анода соответственно в первом и втором случаях. Видно, что при давлении 3 бар

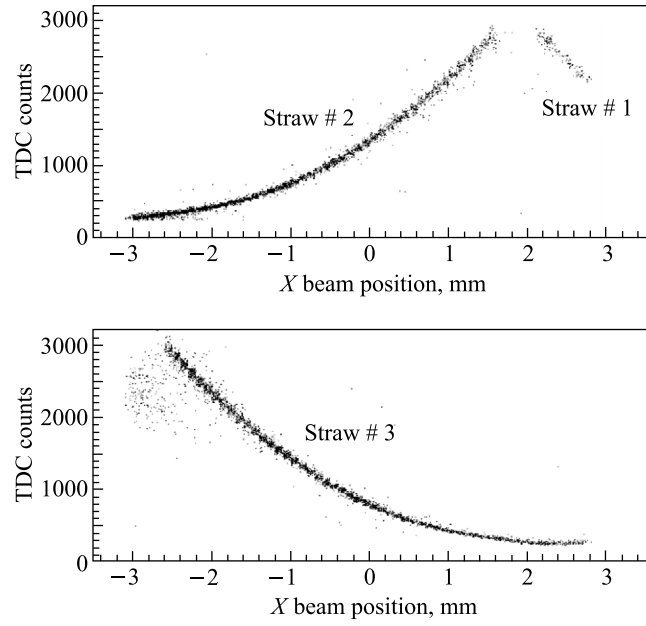


Рис. 35. R–T-зависимость для строу двух слоев прототипа, сдвинутых между собой на радиус строу. Анодное напряжение 3,05 кВ, абсолютное давление газа 3 бар

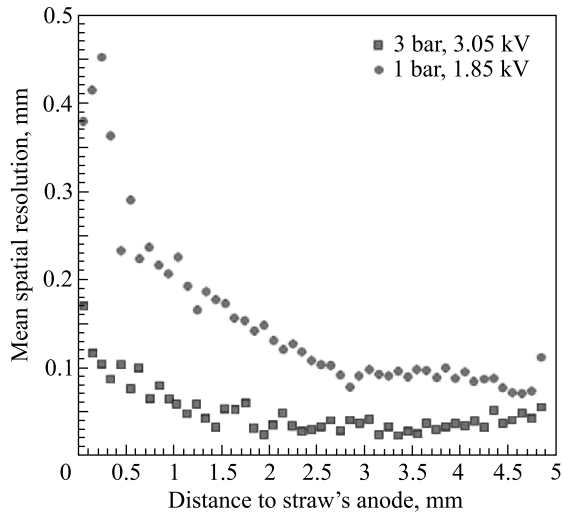


Рис. 36. Пространственное разрешение вдоль радиуса строу при абсолютном давлении 1 и 3 бар при напряжении на аноде 1,85 и 3,05 кВ соответственно

в диапазоне удаления от анода от  $\sim 1,5$  до  $\sim 4,5$  мм разрешение около 40 мкм. Рис. 37 представляет лучшие значения полученного пространственного разрешения в зависимости от давления. Использовались величины  $\sigma$  для строу 2 и 3 в предположении одинакового искажения их реальной величины неравномерностью загрузки вдоль радиуса.

#### 4.5. Переходной режим с высоким пространственным разрешением.

Режим работы строу высокого давления, отвечающий лучшему значению пространственного разрешения, исследовался на стенде при регистрации  $\gamma$ -квантов от источника  $^{55}\text{Fe}$  и электронов от источника  $^{106}\text{Ru}$ , а также был исследован на адронном пучке канала SPS в ЦЕРН. Рабочим газом был  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  (80/20 %), и режимы работы строу изучались при давлении 3 бар в диапазоне анодного напряжения от 2,6 до 3,2 кВ, в котором разрешение  $\sigma$  улучшалось до менее чем 40 мкм [94].

С увеличением давления газовой смеси в газонаполненных детекторах возрастает вероятность образования сильноточкового режима, способного развиваться в самогасящийся стримерный (SQS) режим [47]. Тогда как при нормальном давлении газа, диаметре анодной проволоки 30 мкм и используемой газовой смеси в дрейфовых трубках режим SQS практически отсутствует до появления разрядов в режиме Гейгера–Мюллера.

Зависимость амплитуд сигналов в строу высокого давления от анодного напряжения представлена на рис. 38. Рис. 38, *а* соответствует регистрации

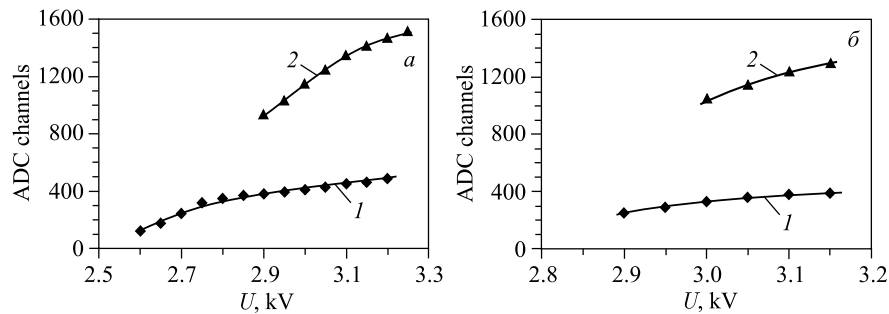


Рис. 38. Величины амплитуд сигналов в разных режимах регистрации  $\gamma$ -квантов (*а*) и электронов (*б*) в зависимости от анодного напряжения. Газовая смесь  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  (80/20 %), давление 3 бар

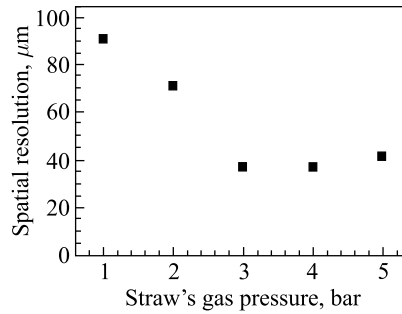


Рис. 37. Лучшие значения пространственного разрешения строу как функция от давления газа с учетом неоднородности загрузки вдоль радиусов строу [93]

$\gamma$ -квантов. Кривая 1 показывает увеличение сигналов в пропорциональном (до напряжения  $\sim 2,85$  кВ) и далее до  $\sim 3,2$  кВ в ограниченно-пропорциональном/насыщенном режимах. Переходной режим от слаботоковых в среднетокковые сигналы (кривая 2) наблюдается в диапазоне  $\sim 2,9$ – $3,2$  кВ, далее сигналы начинают переходить в сильнотокковые сигналы режима SQS.

Количественное соотношение слабо- и среднетокковых сигналов (кривые 1 и 2 соответственно), а также изменение величины тока в строу с ростом анодного напряжения (кривая 3) показаны на рис. 39 (рис. 39, а — для  $\gamma$ -квантов). Начиная с анодного напряжения  $\sim 2,8$  кВ появляются среднетокковые сигналы в количестве нескольких процентов, входящие при напряжении  $\sim 3,2$  кВ в насыщение и начинающие создавать в зоне облучения

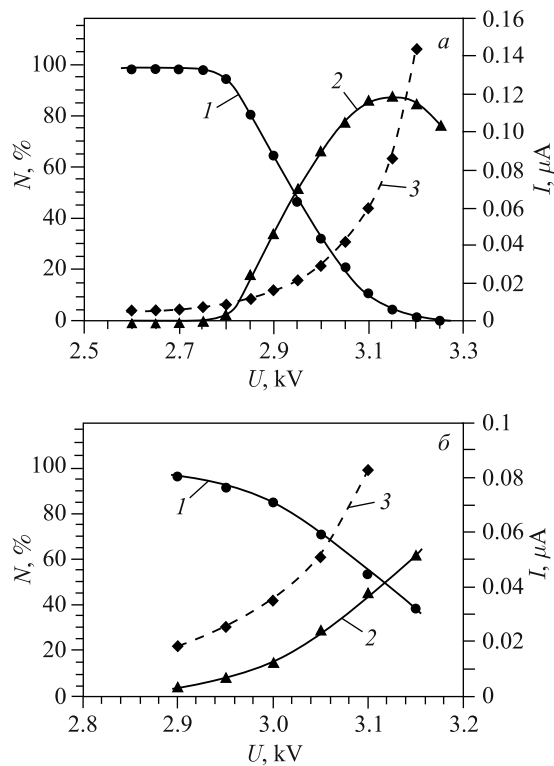


Рис. 39. Соотношение сигналов в разных режимах в зависимости от анодного напряжения при регистрации  $\gamma$ -квантов (а) и при регистрации электронов (б). Кривые 1 соответствуют сигналам в пропорциональном или ограниченно-пропорциональном режимах, кривые 2 — сигналам в среднетокковом режиме. Кривая 3 показывает ток в строу в зависимости от напряжения. Газовая смесь  $\text{Ag}/\text{CO}_2$  (80/20%) и абсолютное давление 3 бар

объемные заряды, влияющие на локальную эффективность строу. Кривая 3 показывает среднюю величину тока в зависимости от анодного напряжения; так, в диапазоне напряжения от 2,6 до 3,2 кВ величина среднего тока при фиксированном потоке  $\gamma$ -квантов увеличивается в 35 раз, возрастая от  $\sim 4$  до  $\sim 140$  нА. При напряжении 3,05 кВ возрастание тока в сравнении с напряжением 2,8 кВ не более 10, что согласуется с соотношением амплитуд сигналов на рис. 38, а. Соотношение слаботоковых и среднетоковых сигналов при напряжении 3,05 кВ составляет 20/80.

Аналогичные зависимости были получены при регистрации электронов с энергией 3,55 МэВ. Зависимости амплитуд сигналов от анодного напряжения представлены на рис. 38, б. Видно, что переходной режим от слаботоковых к среднетоковым сигналам (кривые 1 и 2 соответственно) начинается при анодном напряжении на 100 В более высоком, чем при регистрации  $\gamma$ -квантов. Количественное соотношение слабо- и среднетоковых сигналов (кривые 1 и 2 соответственно), как и изменение величины тока (кривая 3), с ростом анодного напряжения при регистрации электронов показаны на рис. 39, б. Начиная с анодного напряжения  $\sim 2,9$  кВ наблюдается увеличение сильнотоковых сигналов, количество которых достигает  $\sim 60\%$  при напряжении 3,15 кВ (рис. 38). При напряжении 3,05 кВ отношение среднетоковых к сильнотоковым сигналам составляет  $\sim 30/70$ . При регистрации  $\gamma$ -квантов такое же соотношение наблюдается при анодном напряжении около 2,9 кВ. Кривая 3 на рис. 39 показывает среднюю величину тока для одного регистрируемого события в зависимости от анодного напряжения. При напряжении 3,05 кВ эта величина составляет 50 нА, но является завышенной более чем в два раза, так как в нее входит средняя величина тока от попадающих в строу электронов с энергией 39,2 кэВ от  $^{106}\text{Ru}$ , но не дающих триггерных сигналов.

Таким образом, с газовой смесью  $\text{Ag}/\text{CO}_2$  (80/20%) в диапазоне давления 3–4 бар возможна работа строу в *переходном* режиме от ограниченно-пропорционального в СГС. Этот режим характеризуется высокой стабильностью, увеличением тока в строу с фактором не более 10 и пространственным разрешением для МПР около  $\sim 40$  мкм.

Радиационное тестирование в *переходном* режиме работы строу было выполнено с использованием рентгеновской трубки с медным анодом. За  $\sim 2600$  ч равномерного облучения строу по всей длине средняя величина выделенного заряда на 1 см длины составила 4,2 Кл. Результаты сканирования мониторной и облученной строу показали отсутствие эффектов старения строу. Ухудшение энергетического разрешения также отсутствовало.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимущества координатных детекторов на основе строу по сравнению с координатными детекторами других видов следующие:

- минимальная величина радиационной толщины детекторов на основе строу при возможности создания многоканальных детекторов с большим аксептансом;
- высокая радиационная стойкость, объясняемая постоянным обновлением рабочего вещества (газовой смеси) и широкими возможностями отбора необходимых для создания детекторов материалов;
- высокая локальная загрузочная способность, пока не реализованная;
- работа в достаточно широком диапазоне дифференциального давления газового наполнения;
- высокие эксплуатационные свойства с возможностями мониторинга и стабилизации рабочих параметров;
- широкие возможности оптимизации параметров оригинальных детекторов для решения частных экспериментальных задач;
- потенциальные возможности:
  - создание гранулированных строу-детекторов,
  - создание быстрых двумерных координатных детекторов в результате развития катодного считывания и реализации одновременного определения радиальных и продольных координат методом временного считывания,
  - обеспечение радиального и продольного разрешения на уровне 0,005 и  $\sim 1$  см соответственно.

МПК и ДК эффективно использовались в прикладных исследованиях [95]. Детекторы переходного излучения на основе строу используются для астрофизических исследований [96–98]. Очевидно наличие задач в прикладных исследованиях, например, показанных в работах [99, 100], решение которых возможно с помощью детекторов на основе строу.

В заключение автор выражает благодарность своему коллеге В. В. Мялковскому за помощь в подготовке рисунков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Charpak G. et al.* The Use of Multiwire Proportional Counters to Select and Localize Charged Particles // Nucl. Instr. Meth. 1968. V. 62. P. 262–268.
2. *Sauli F.* Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers. CERN-77-09. Geneva, 1977. P. 1–92.
3. *Grupen C.* Particle Detectors. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1996.
4. *Sauli F.* Further Developments of the Gas Electron Multiplier (GEM) // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 419. P. 410–417.
5. *Будимов В. А. и др.* Исследование характеристик дрейфовой камеры в пучке медленных ядерных фрагментов // ПТЭ. 1985. № 2. С. 48–51.



6. *Pinto S. D. (on Behalf of the Collab.)*. Micropattern Gas Detector Technologies and Applications, the Work of the RD51 Collaboration // IEEE Nucl. Sci. Symp. 2010. Conf. Record. 2010; arXiv:1011.5529.
7. *Sauli F.* A New Concept for Electron Amplification in Gas Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 386. P. 531–534.
8. *Бузулуцков А. Ф.* Детекторы излучений на основе газовых электронных умножителей // ПТЭ. 2007. №3. С. 5–30.
9. *Giomataris Y. et al.* MICROMEAS: a High-Granularity Position-Sensitive Gaseous Detector for High Particle-Flux Environments // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 376. P. 29–35.
10. *Pomaredé D. (for the ATLAS Collab.)*. Detector Description of the ATLAS Muon Spectrometer // Intern. J. Mod. Phys. A. 2005. V. 20. P. 3886–3888.
11. *Bychkov V. N. et al.* The Large Size Straw Drift Chambers of the COMPASS Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 62. P. 66–79.
12. *Abbon P. A. et al. (COMPASS Collab.)*. The COMPASS Experiment at CERN // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 577. P. 455–518.
13. *Abat E. et al. (The ATLAS TRT Collab.)*. The ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT) Proportional Drift Tube: Design and Performance // JINST. 2008. V. 3. P02013. P. 1–22.
14. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // Ibid. S08003. P. 1–407.
15. *Gusakov Yu. V. et al.* ATLAS TRT: Research & Design B-Type Module Mass Production // Phys. Part. Nucl. 2010. V. 41, No. 1. P. 1–26.
16. *LHCb Collab.* LHCb: Technical Design Report — Reoptimized Detector Design and Performance. CERN-LHCC-2003-030. Geneva: CERN, 2003.
17. *Alves Jr. et al. (LHCb Collab.)*. The LHCb Detector at the LHC // JINST. 2008. V. 3. S08005. P. 1–217.
18. *Erni W. et al. (PANDA Collab.)*. Technical Design Report for the PANDA (AntiProton Annihilations at Darmstadt) Straw Tube Tracker // Eur. Phys. J. A. 2013. V. 49. Article: 25.
19. *Wintz P.* A Large Tracking Detector in Vacuum Consisting of Self-Supporting Straw Tubes // Proc. of Intersections of Particle and Nuclear Physics: 8th Conf. CIPANP, 2003. 2004. V. 698, No. 1. P. 789–792.
20. *Avanzini C. et al.* Test of a Small Prototype of the KLOE Drift Chamber in Magnetic Field // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 449. P. 237–247.
21. *Semertzidis Y. K. (for the MECO Collab.)*. The MECO Experiment at BNL // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2005. V. 149. P. 372–374.
22. *Molzon W. (MECO Collab.)*. The MECO Experiment to Search for Lepton Flavor Violation // Proc. of the Intern. KEK Workshop on Kaon, Muon, and Neutrino Physics and Future, Tsukuba, Japan, 1997 / Ed. by Y. Kuno and T. Shinkawa. KEK, Tsukuba, 1998. P. 195–207.

23. *Howell B., Koltick D., Kobayashi M.* Crimping: a Wire Fastening Technique in Wire Chamber Construction // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1990. V. 289. P. 185–193.
24. *Bytchkov V. N. et al.* Construction and Manufacture of Large Size Straw-Chambers of the COMPASS Spectrometer Tracking System // *Part. Nucl., Lett.* 2002. No. 2[111]. P. 64–73.
25. *Arai Y. et al. (SDC Collab.).* A Modular Straw Drift Tube Tracking System for the Solenoidal Detector Collaboration Experiment. Part. Design // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1996. V. 381. P. 355–371.
26. *Hauviller K. et al.* Radiation Hardness of Polysulphone and Polycarbonate Elements for LHC Detectors. *JINR Commun.* E14-98-245. Dubna, 1998. 11 p.
27. *Гладких С. Н. и др.* Радиационная стойкость некоторых полимеров и эпоксидных клеев. Препринт ОИЯИ Р13-2001-275. Дубна, 2001. 6 с.
28. *Bino R. et al.* Charge Division in a Small Proportional Chamber Constructed with Aluminized Mylar Tubes // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1988. V. 271. P. 417–422.
29. *Takubo Y. et al.* Development and Performance of Resistive Seamless Straw-Tube Gas Chambers // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2005. V. 551. P. 271–284.
30. *Oh S. H., Goshaw A. T., Robertson W. J.* Construction and Performance of a 2.7 m Long Straw Drift Tube Prototype Chamber for the SSC // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1991. V. 309. P. 368–376.
31. *Ogren H. et al. (represented the SDC Collab.).* The Straw Tracker for the SDC Detector // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1995. V. 367, No. 1–3. P. 133–137.
32. *Bychkov V. N. et al.* Some Characteristics of the Long Straw Drift Tubes. *JINR Commun.* E13-98-209. Dubna, 1998. 12 p.
33. *Vasilyev S. E. et al.* Signal Transmission Line for Large-Size Segmented Straw Detectors // *Instr. Exp. Tech.* 2008. V. 51, No. 6. P. 820–825.
34. *Marzec J. et al.* Signal Propagation in Straw Tubes with Resistive Cathode // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2000. V. 47, No. 1. P. 18–24.
35. *Lu C. et al.* Proposal to the SSC Laboratory for Research and Development of a Straw-Tube Tracking Subsystem. *SSC-PC-029.* 1989. P. 1–49.
36. *Boie R. A. et al.* Second Coordinate Readout in Drift Chambers by Timing of the Electromagnetic Wave Propagating Along the Anode Wire // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1988. V. NS28. P. 471–477.
37. *Калашникова В. И., Козодаев М. С.* Детекторы элементарных частиц. М.: Наука, 1966.
38. *Клайнкнехт К.* Детекторы корпускулярных излучений. М.: Мир, 1990.
39. *Додохов В. Х., Жуков В. А.* Первый коэффициент Таунсенда в аргоне, ксеноне и их смеси. Препринт ОИЯИ Р13-80-486. Дубна, 1980. 11 с.
40. *Перкинс Д.* Введение в физику высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1991.

41. *van der Eijk R. M.* LHCb Outer Tracker Straw Detector // *van der Eijk R. M.* Track Reconstruction in the LHCb Experiment: Dissertation. Univ. of Amsterdam, 2002. P. 45–57.
42. *Cattai A., Rolandi G.* Wire Chambers / Gas-Filled Detectors // Particle Detectors. Geneva: CERN, 1999. P. 24–26.
43. *Dikumar V. V. et al.* The Spatial Resolution of Two-Layer Coordinate Detectors Based on Thin-Walled Drift Tubes // Phys. Part. Nucl. Lett. 2012. V. 9, No. 1. P. 54–57.
44. *Peisert A., Sauli F.* Drift and Diffusion Electrons in Gases: a Compilation. EP, CERN 84-08. Geneva, 1984. P. 1–127.
45. *Bychkov V. N. et al.* High Precision Straw Tube Chamber with Cathode Readout // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 325. P. 158–160.
46. *Bychkov V. N. et al.* Cathode Readout with Stripped Resistive Drift Tubes // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 367. P. 276–279.
47. *Алексеев Г. Д., Хазинс Д. М., Круглов В. В.* Самогасящийся стримерный разряд в проволочной камере // ЭЧАЯ. 1982. Т. 13, № 3. С. 703–748.
48. *Lowke J. J., Parker J. H.* Theory of Electron Diffusion Parallel to Electric Fields. 2. Application to Real Gases // Phys. Rev. 1969. V. 181. P. 302–311.
49. *Lucenko V. M., Myalkovskii V. V., Peshekhonov V. D.* Time-Amplitude Characteristics of Thin-Walled Drift Tubes (Straw) for Gas Mixture ArCO<sub>2</sub> with Additives CF<sub>4</sub> and O<sub>2</sub> // Phys. Part. Nucl. Lett. 2006. V. 3, No. 5. P. 273–279.
50. *Vaandering E. W. (BTeV Collab.).* The BTeV Experiment // Eur. Phys. J. C. 2004. V. 33, No. 01. P. 987–989.
51. *Abat E. et al. (The ATLAS TRT Collab.).* The ATLAS TRT Barrel Detector // JINST. 2008. V. 3. P02014. P. 1–45.
52. *Sharma A., Sauli F.* Low Mass Gas Mixtures for Drift Chambers Operation. CERN, CTRN-PPE/110. Geneva, 1994. P. 1–10.
53. *Deptuch M. et al.* The Temperature Coefficient of the Gas Gain in TRT Detector. CERN ATL-INDET-2002-0112002. Geneva, 2002. P. 1–8.
54. *Cwetanski P.* Straw Performance Studies and Quality Assurance for the ATLAS Transition Radiation Tracker. Doct. Dissertation. Univ. of Helsinki. HU-P-D133. CERN-THESIS-2006-025. Geneva, 2006. P. 1–139.
55. *Bachman S. et al.* The Straw Tube Technology for the LHCb Outer Tracking System // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 535. P. 171–174.
56. *King S. F. et al. (The ISS Physics Working Group).* Physics at a Future Neutrino Factory and Super-Beam Facility // Rep. Prog. Phys. 2009. V. 72. P. 106–201.
57. *Wintz P.* A Large Tracking Detector in Vacuum Consisting of Self-Supporting Straw Tubes // AIP Conf. Proc. 2004. V. 698. P. 789–792.
58. *Sokolov A., Ritman J., Wintz P.* Application of the Time-Dependent Charge Asymmetry Method for Longitudinal Position Determination in Prototype Proportional Chamber for the PANDA Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 574. P. 50–57.

59. Жуков И. А. и др. Исследования нагрузочных способностей тонкопленочных дрейфовых трубок (строу). Препринт ОИЯИ P13-2005-126. Дубна, 2005. 5 с.
60. Akesson T. et al. (RD6 Collab.). The ATLAS TRT Straw Proportional Tubes: Performance at Very High Counting Rate // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 367. P. 143–153.
61. Oh S. H., Wang C. H., Ebenstein W. L. A Super High Rate Straw Drift Chamber // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 425. P. 75–83.
62. Sadrozinski H. F.-W., Seiden A. Tracking Detectors for the sLHC, the LHC Upgrade // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 541. P. 434–440.
63. Viriasov K. S. et al. Two-Wire Anodes for the Straw Detectors. JINR Commun. E13-2005-127. Dubna, 2005. 4 p.
64. Davkov K. et al. Development of Segmented Straws for Very High-Rate Capability Coordinate Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 584. P. 285–290.
65. Давков К. И. и др. Разработка кабеля считывания с малым количеством вещества для сегментных дрейфовых трубок. Препринт ОИЯИ P13-2010-105. Дубна, 2010. 5 с.
66. Davkov V. et al. Development of High Granulated Straw Chambers of Large Sizes // Phys. Part. Nucl. Lett. 2007. V. 4, No. 7. P. 545–555.
67. Bazylev S. N. et al. A Prototype Coordinate Detector Based on Granulated Thin-Walled Drift Tubes // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 632. P. 75–80.
68. Gusakov Yu. V. et al. Multichannel Prototype Detector Based on Segmented Straws // Phys. Part. Nucl. 2010. V. 7, No. 12. P. 132–137.
69. Akesson T. et al. (The ATLAS TRT Collab.). Straw Tube Drift-Time Properties and Electronics Parameters for the ATLAS TRT Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 449. P. 446–460.
70. Haas T. (EUDET Collab.). A Pixel Telescope for Detector & for an International Linear Collider // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 569. P. 53–56.
71. Haas D. EUDET Pixel Telescope Data Taking Manual — Updated Version 2009 // EUDET-Memo-2008-52. Geneva, 2008. P. 1–11; <http://www.eudet.org>.
72. Debbe K., Radeka V., O'Brien E. A Study of Wire Chamber with Highly Segmented Cathode Pad Readout for High Multiplicity Charged Particle Detection // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1990. V. 37, No. 2. P. 88–94.
73. Lau K., Mayes B., Pyrlík J. Test Results of a High Precision Cathode Strip Chamber Based on Plastic Streamer Tubes // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 381. P. 39–48.
74. Lau K., Pyrlík J. Optimization of Centroid-Finding Algorithms for Cathode Strip Chamber // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 366. P. 298–309.
75. Battistoni G. et al. Resistive Cathode Transparency // Nucl. Instr. Meth. A. 1982. V. 202. P. 459–464.
76. Golutvin I. A. et al. Two Methods to Estimate the Position Resolution — for Straw Chambers with Strip Readout // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 333. P. 536–539.

77. *Bychkov V.N. et al.* Spatial Characteristics of Thin-Film Straw Detectors with a Cathode Readout // *Instr. Exp. Tech.* 1998. V. 41, No. 3. P. 315–319.
78. *Chiba J. et al.* Study of Position Resolution for Cathode Readout MWPC with Measurement of Induced Charge Distribution // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1983. V. 206. P. 451–463.
79. *Кучинский Н. А. и др.* Использование катодной поверхности дрейфовой трубки для создания трекового детектора с высокой нагрузочной способностью. Препринт ОИЯИ Р13-2013-100. Дубна, 2013. 6 с.
80. *Costanza S. et al.* The Straw Tube Tracker of the PANDA Experiment // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2010. V. 617. P. 148–150.
81. *Makankin A.M. et al.* A Direct Time Measurement Technique for the Two-Dimensional Precision Coordinate Detectors Based on Thin-Walled Drift Tubes // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2014. V. 735. P. 649–654.
82. *Васильев С. Е. и др.* Метод прямого временного измерения для определения продольной координаты в тонкостенных дрейфовых трубках // *ПТЭ.* 2014. № 5. С. 47–52.
83. *Filatova N.A. et al.* Study of Drift Chamber System for a  $K^-e$  Scattering Experiment at the Fermi National Accelerator Laboratory // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1977. V. 143. P. 17–28.
84. *Farr W. et al.* Space Resolution of Drift Chambers Operated at High Gas Pressure // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1978. V. 154. P. 175–181.
85. *Barbarito E. et al.* Straw Chambers Operation in Vacuum for Particles Tracking and Transition Radiation Detection in Accelerator and Space Experiments // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1996. V. 381. P. 39–48.
86. *Nunighoff K. et al.* A Light Tracker Detector Working in Vacuum // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2002. V. 477. P. 410–413.
87. *Davkov V.I. et al.* High-Pressure Thin-Wall Drift Tubes // *Instr. Exp. Tech.* 2008. V. 51, No. 6. P. 787–791.
88. *Naito Y. et al.* Pressure Dependence of Gas Permeability in a Rubbery Polymer // *J. Appl. Polym. Sci.* 1996. V. 61. P. 945–950.
89. *Klopffer M.H., Flaconnèche B.* Transport Properties of Gases in Polymers: Bibliographic Review // *Oil & Gas Sci. Technol. Rev. IFP.* 2001. V. 56, No. 3. P. 223–244.
90. *Tsukioka H. et al.* New Apparatus for Detecting  $H_2$ ,  $CO$ , and  $CH_4$  Dissolved in Transformer Oil // *IEEE Trans. Electr. Insulation.* 1983. V. E1-18, No. 4. P. 409–419.
91. *Davkov K.I. et al.* A Coordinate Muon Chamber Based on Thin-Walled Drift Tubes // *Instr. Exp. Tech.* 2013. V. 56, No. 5. P. 525–530.
92. *Peshkhonov V.D.* New Capabilities of Coordinate Detectors on the Basis of Straws // *PoS (ICHEP 2010).* 2010. P. 508.
93. *Davkov V.I. et al.* Spatial Resolution of Thin-Walled High-Pressure Drift Tubes // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 634. P. 5–7.

- 
94. *Davkov K. I. et al.* Operating Mode of High Pressure Straws with High Spatial Resolution // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11, No. 3. P. 269–273.
  95. *Пешехонов В. Д.* Методика газонаполненных координатных детекторов и их применение для биомедицинских исследований // *ЭЧАЯ.* 1986. Т. 17, № 5. С. 1031–1078.
  96. *Ahn H. S. et al.* The Cosmic Ray Energetics and Mass (CREAM) Instrument // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2007. V. 579. P. 1034–1053.
  97. *von Doetinchem P. et al.* Performance of the AMS-02 Transition Radiation Detector AMS // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2006. V. 558. P. 526–535.
  98. *Siedenburg Th.* A Transition Radiation Detector for AMS // *Nucl. Phys. B.* 2002. V. 113. P. 154–158.
  99. *Shehad N. N. et al.* Small Animal PET Camera Design Based on 2-mm Straw Detectors // *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Record.* 2006. P. 2462–2468.
  100. *Lacy J. L., Martin C. S., Armendarez L. P.* High Sensitivity, Low Cost PET Using Lead-Walled Straw Detectors // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2001. V. 471. P. 88–93.