

## РЕЖИМ РАБОТЫ ТОНКОСТЕННЫХ ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

*К. И. Давков, В. В. Мялковский, В. Д. Пешехонов, В. Д. Чолаков*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В работе представлены результаты изучения режима работы тонкостенных дрейфовых трубок (строу) при их продуве газовой смесью высокого давления, в котором ранее было получено экстремально высокое пространственное разрешение для детекторов на основе строу. Приведены результаты исследования радиационного старения строу, работающих в этом режиме.

This article presents results of studying the operating mode of thin-walled drift tubes (straws) with the use of a high pressure gas mixture in which an extremely high spatial resolution for straw-based detectors was obtained in previous studies. Results of research of radiation aging straws operating in this mode are given.

PACS: 07.07.Df

### ВВЕДЕНИЕ

Тонкостенные дрейфовые трубки (ТДТ, или строу) широко используются в экспериментах на ускорителях как детектирующие элементы трековых детекторов при регистрации заряженных частиц, что определяется, главным образом, их малой радиационной толщиной и хорошей радиационной стойкостью. Примерами эффективного их использования служат: детектор переходного излучения — трекер внутреннего детектора АТЛАС, трековые детекторы установок COMPASS, LHCb и др. [1–3]. Строу-детекторы могут обладать большой чувствительной площадью, высокой газовой герметичностью и способны работать при продуве их газовой смесью с давлением до 5 бар.

Координатные детекторы на основе строу высокого давления способны работать как в пропорциональном, ограниченно пропорциональном режимах, так и в самогасящемся стримерном режиме. При регистрации заряженных частиц с минимальными ионизационными потерями в токовом режиме их детектирования на ускорителе SPS ЦЕРН было ранее получено пространственное разрешение лучше 40 мкм при давлении газовой смеси в диапазоне 3–4 бар [4, 5]. В работе представлены результаты изучения этого режима работы строу, а также исследования их радиационного старения в этом режиме.

## 1. РЕЖИМ РАБОТЫ СТРОУ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

**1.1. Стендовая установка.** ТДТ с внутренним диаметром 9,53 мм были намотаны двумя каптоновыми лентами. Для внутренней ленты использовалась пленка с графитовым наполнением толщиной 40 мкм типа ХС-160, для наружной ленты — пленка типа HN50 толщиной 12,5 мкм с Al-покрытием толщиной около 0,2 мкм. Толщина стенки строу составляет  $\sim 60$  мкм. В качестве анода использовалась золоченая вольфрамовая проволока диаметром 30 мкм с сопротивлением 70 Ом/м.

Режим работы строу изучался в стендовых условиях при облучении их  $\gamma$ -квантами с энергией 5,9 кэВ от источника Fe-55 и электронами с энергией 3,55 МэВ от источника Ru-106. Строу продувались газовой смесью ArCO<sub>2</sub> (80/20) при абсолютном давлении газового наполнения 3 бар.

Усилители на основе микросхемы MSD-2 с усилением 35 мВ/мкА и временем нарастания фронта 4 нс, идентичные применяемым при измерении радиальных координат [5, 6], были использованы для регистрации анодных сигналов. Импульсы с выхода усилителя поступали в аналого-цифровой преобразователь устройства DRS-4 [7], оцифровывающего входной сигнал со скоростью 5 ГГц, запоминающего амплитуду и форму сигнала, и передавались далее в ПК для обработки амплитудных спектров. При регистрации высокоэнергетических электронов источника Ru-106 отбор событий осуществлялся по совпадению сигналов со строу и сцинтиляционного счетчика. Схема установки приведена на рис. 1.

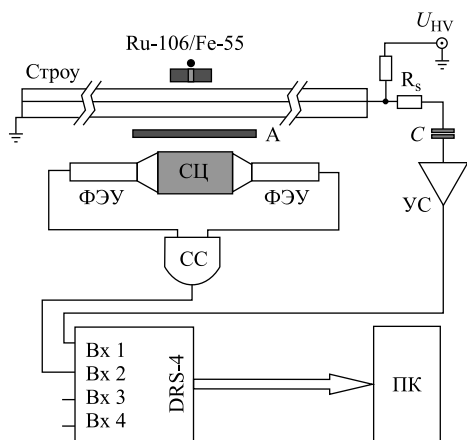


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для изучения режима работы строу: Строу — исследуемая тонкостенная дрейфовая трубка; А — поглотитель низкоэнергетических электронов источника Ru-106; СЦ — сцинтиляционный счетчик с двумя фотоумножителями (ФЭУ); СС — схема совпадений; УС — быстрый токовый усилитель; R<sub>s</sub> — последовательный резистор для согласования строу с усилителем; DRS-4 — аналого-цифровой преобразователь

**1.2. Исследования режима работы строу.** Режимы работы строу изучались при давлении 3 бар в диапазоне анодного напряжения от 2,6 до 3,2 кВ, при котором пространственное разрешение  $\sigma$  с увеличением напряжения улучшалось от  $\sim 60$  до менее чем 40 мкм [5].

Известно, что с увеличением давления газовой смеси в дрейфовых детекторах возрастает вероятность образования сильнотокового режима, способного развиваться в так называемый самогасящийся стримерный режим (СГС) [8], тогда как при нормальном давлении, диаметре анодной проволоки 30 мкм и используемой газовой смеси в дрейфовых трубках СГС режим практически отсутствует до максимально возможного анодного напряжения.

**1.3. Регистрация  $\gamma$ -квантов источника Fe-55.** Спектры сигналов от гамма-квантов источника Fe-55 при давлении газового наполнения строу 3 бар и анодном напряжении в диапазоне от 2,6 до 3,2 кВ показаны на рис. 2. При напряжении 2,6 кВ (энергетическое разрешение строу около 33 %) и 2,65 кВ видны пик полного поглощения (5,9 кэВ) и пик вылета (2,95 кэВ), что указывает на работу строу в режиме пропорционального усиления. При напряжениях от 2,7 до 2,8 кВ пик вылета начинает сливаться с пиком полного поглощения, что указывает на переход от режима ограниченной пропорциональности в режим насыщенных сигналов. При напряжении около 2,9 кВ начинают появляться сильноточковые сигналы, количество которых с увеличением напряжения до 3,05 кВ становится преобладающим, а при 3,2 кВ строу практически полностью переходит в сильноточковый режим. Показанные на рис. 2 спектры хорошо согласуются со спектрами работы [8].

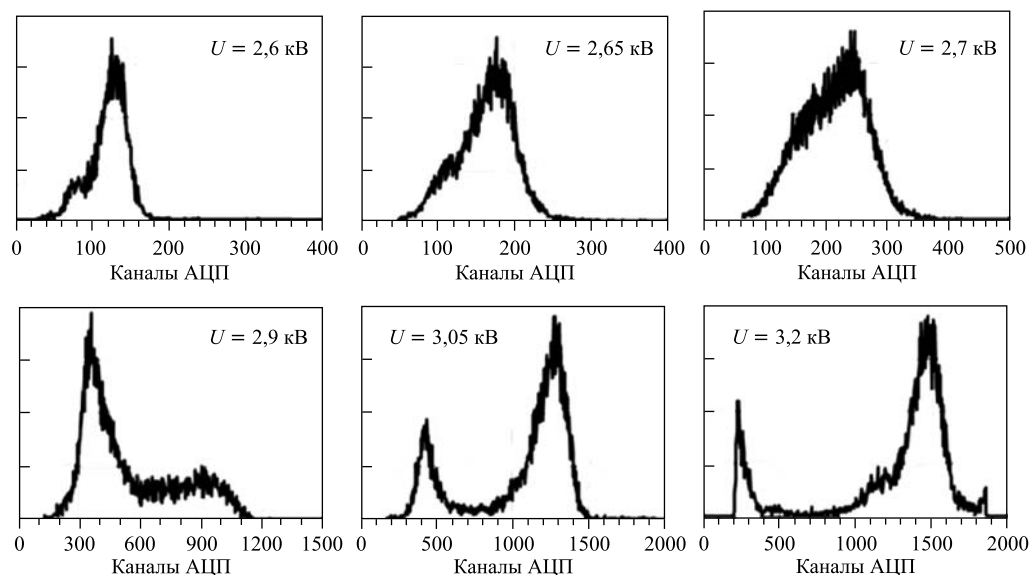


Рис. 2. Спектры сигналов от источника Fe-55 при различных анодных напряжениях. Давление газового наполнения — 3 бар

Зависимость амплитуд сигналов  $\gamma$ -квантов от анодного напряжения представлена на рис. 3. Кривая 1 показывает величины сигналов в пропорциональном (до напряжения  $\sim 2,85$  кВ) и далее до  $\sim 3,2$  кВ в ограниченно-пропорциональном/насыщенном режимах. Переходной режим от слабо- к сильноточковым сигналам наблюдается в диапазоне  $\sim 2,9$ – $3,2$  кВ, далее наблюдаются сигналы в режиме СГС (кривая 2). Амплитуды сигналов при этом возрастают относительно сигналов в пропорциональном режиме с фактором до 10.

Изменение количественного соотношения слабо- и сильноточковых сигналов (кривые 1 и 2 соответственно), а также величины тока в строу с ростом анодного напряжения (кривая 3) показано на рис. 4. Начиная с анодного напряжения  $\sim 2,8$  кВ появляются в количестве нескольких процентов сильноточковые сигналы, входящие при напряжении  $\sim 3,2$  кВ в насыщение и приводящие к появлению в зоне облучения объемного заряда,

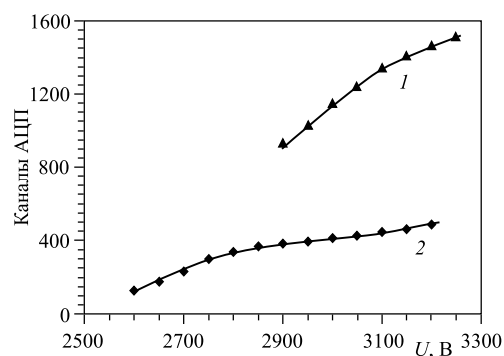


Рис. 3. Величины сигналов в разных режимах регистрации  $\gamma$ -квантов источника Fe-55 в зависимости от анодного напряжения. Газовая смесь —  $\text{AgCO}_2$  (80/20) при давлении 3 бар

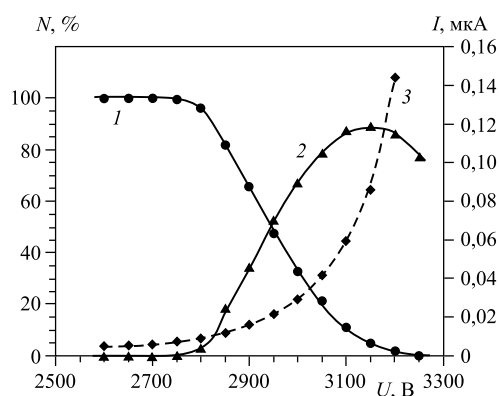


Рис. 4. Соотношение сигналов в разных режимах их регистрации в строу в зависимости от анодного напряжения. 1 — сигналы от  $\gamma$ -квантов в пропорциональном или ограниченно-пропорциональном режиме; 2 — сигналы в сильноточковом режиме; 3 — ток в строу в зависимости от напряжения. Источник — Fe-55, газовая смесь —  $\text{AgCO}_2$  (80/20) при давлении 3 бар

влияющего на локальную эффективность строу. Кривая 3 показывает среднюю величину тока в строу в зависимости от анодного напряжения. Видно, что в диапазоне напряжения 2,6–3,2 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 относительно напряжения 2,8 кВ не более 10, что согласуется с соотношением амплитуд сигналов на рис. 3. Отношение слаботоковых к сильноточковым сигналам при напряжении 3,05 кВ составляет 20/80.

**1.4. Регистрация электронов источника Ru-106.** Зависимости, аналогичные полученным при регистрации гамма-квантов, были получены при регистрации высокоэнергетических электронов от источника Ru-106. Зависимости амплитуд сигналов при регистрации электронов с энергией 3,55 МэВ от анодного напряжения представлены на рис. 5. Видно, что переходной режим от слаботоковых к сильноточковым сигналам (кривые 1 и 2 соответственно) начинается с анодного напряжения на 100 В более высокого, чем при регистрации  $\gamma$ -квантов.

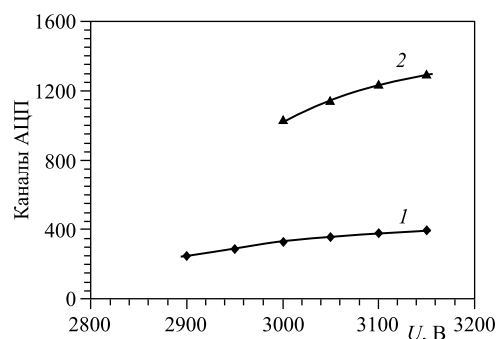


Рис. 5. Величины сигналов от источника Ru-106 в зависимости от анодного напряжения. Газовая смесь — ArCO<sub>2</sub> (80/20), давление — 3 бар. 1 — сигналы в пропорциональном или ограниченно-пропорциональном режиме; 2 — сигналы в сильноточковом режиме

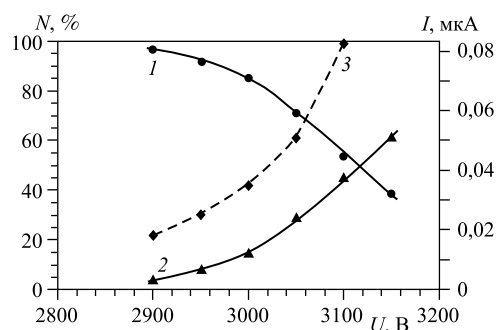


Рис. 6. Соотношение сигналов в разных режимах их регистрации в строу в зависимости от анодного напряжения. Источник — Ru-106, газовая смесь — ArCO<sub>2</sub> (80/20) при давлении 3 бар. 1 — сигналы от высокоэнергетических электронов в пропорциональном или ограниченно-пропорциональном режиме; 2 — сигналы в сильноточковом режиме; 3 — ток в строу в зависимости от анодного напряжения

Изменение количественного соотношения слабо- и сильноточковых сигналов (кривые 1 и 2 соответственно), как и изменение величины тока (кривая 3) в строу, с ростом анодного напряжения при регистрации электронов показаны на рис. 6. Начиная с анодного напряжения ~ 2,9 кВ наблюдается увеличение сильноточковых сигналов, количество которых достигает ~ 60 % при напряжении 3,15 кВ (рис. 6). При напряжении 3,05 кВ отношение слабо- и сильноточковых сигналов составляет 30/70. При регистрации квантов от источника Fe-55 это же соотношение наблюдается для анодного напряжения около 2,9 кВ. Кривая 3 на рис. 6 показывает среднюю величину тока, приходящегося на одно регистрируемое событие, 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 средний ток от нерегистрируемых электроникой низкоэнергетических электронов с энергией 39,2 кэВ, излучаемых источником.

*Основной вывод.* Для газовой смеси ArCO<sub>2</sub> (80/20) в диапазоне ее давления ~ 3–4 бар возможна работа строу в переходном режиме от ограниченно-пропорционального (насыщенного) к сильноточковому режиму. При этом регистрируются сигналы обоих видов в

стабильном их соотношении, зависящем от анодного напряжения. Пространственное разрешение строу в этом режиме работы детектора может быть повышено до  $\sim 40$  мкм [5]. При этом фактор увеличения тока в строу не более 10.

Следует отметить, что при регистрации  $\gamma$ -квантов и заряженных частиц при близких величинах их энергетических потерь вход строу в переходной режим наблюдается для квантов при более низком значении анодного напряжения.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЯ СТАРЕНИЯ СТРОУ

**2.1. Стендовая установка.** Существенным фактором, влияющим на работоспособность детекторов, является их радиационное старение. Рабочее вещество дрейфовых трубок постоянно обновляется, поэтому эффекты старения газонаполненных детекторов, определяемые, главным образом, величиной аккумулированного в них заряда, происходят из-за полимеризации загрязнений на аноде и/или катоде в результате возможных химических реакций с участием активных радикалов, что приводит к изменению параметров детекторов.

Для проверки возможности долговременной работы строу в исследованном выше переходном режиме были проведены исследования радиационной стойкости при рентгеновском облучении их в стендовых условиях.

На стенде (рис. 7) располагались исследуемый и мониторный прототипы, содержащие идентичные описанным выше строу длиной 11,3 см. Строу одного прототипа облучалась по всей ее длине однородным по интенсивности пучком  $\gamma$ -квантов от рентгеновской трубки (РТ) с медным анодом при напряжении 9 кВ. Строу другого прототипа являлась мониторным детектором (МД) и использовалась для получения сравнительных амплитудных характеристик с облучаемой рентгеновским излучением строу при ее тестировании. Мониторная строу с постоянно расположенным в ее центре коллимированным источником Fe-55 облучалась при загрузке  $\sim 100$  Гц на 1 см длины анода, что исключало возможность возникновения в ней эффектов старения. Обе строу располагались в не-

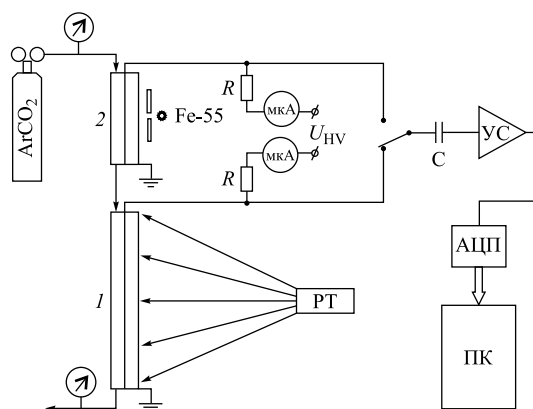


Рис. 7. Блок-схема экспериментального стенда: 1 — исследуемая строу; 2 — мониторный счетчик; РТ — рентгеновская трубка; УС — быстрый токовый усилитель; АЦП — амплитудно-цифровой преобразователь; ПК — компьютер

посредственной близости и продувались последовательно газовой смесью  $\text{ArCO}_2$  (80/20) со скоростью  $\sim 20 \text{ см}^3/\text{ч}$  при абсолютном давлении газовой смеси  $(3 \pm 0,02)$  бар, что исключало возможность различия величины их газового усиления из-за изменений парциального давления составляющих смеси и внешних параметров — температуры и давления окружающей среды.

Анодное напряжение строу при ее облучении РТ было 3,05 кВ, средний ток составлял  $\sim 3 \text{ мкА}$  при средней нагрузке  $\sim 340 \text{ кГц}$  (30 кГц/см длины анода).

**2.2. Результаты исследования.** Перед началом исследований при давлении газовой смеси 1 бар был установлен режим тестирования облучаемой строу при газовом усилении  $\sim 2 \cdot 10^4$ . При этом амплитуда усиленных сигналов от квантов источника Fe-55 по всей длине строу обоих прототипов составляла 100 мВ. Затем проверялась однородность облучения исследуемой строу по длине анода сканированием квантами от РТ через щелевой коллиматор. Разница интенсивности облучения в середине и на концах строу не превышала 15 %.

После аккумуляирования в облучаемой строу каждые  $\sim 0,5 \text{ Кл/см}$  заряда проводилось ее тестирование, при этом измерялись амплитуды сигналов и энергетическое разрешение по длине анода и проводилось сравнение этих величин с параметрами мониторингной строу.

За  $\sim 2600 \text{ ч}$  облучения средняя величина выделенного заряда на 1 см длины строу составила 4,2 Кл. Результаты сканирования мониторингной и облученной строу представлены на рис. 8 кривыми 1 и 2 соответственно. Виден слабый эффект радиационного старения, заключающийся в уменьшении амплитуды сигналов до  $\sim 8 \%$  вдоль облученной строу по направлению ее продува газовой смесью. Ухудшения энергетического разрешения не было обнаружено.

Газовая смесь в облучаемой строу (объемом  $\sim 8,1 \text{ см}^3$ ) при скорости продува  $20 \text{ см}^3/\text{ч}$ , полностью сменялась через 24 мин, т. е. облучение входящего в строу слоя газа в ортогональном к аноду срезе толщиной 1 мм увеличивается к моменту его выхода в  $\sim 10^3$  раз. Это указывает на возможность повышенной полимеризации вдоль строу из-за низкой скорости продува при облучении строу по всей длине. Кроме того, можно отметить, что в нашем случае токи переходного режима при регистрации  $\gamma$ -квантов выше, чем при регистрации заряженных частиц с минимальными ионизационными потерями, как показано выше.

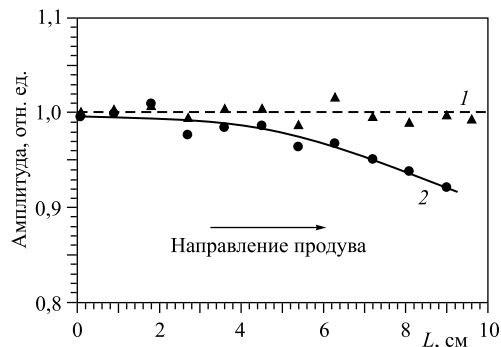


Рис. 8. Амплитуды сигналов по длине строу мониторингного (кривая 1) и облученного (кривая 2) прототипов. Давление — 1 бар, газовое усиление  $\sim 2 \cdot 10^4$ . Средняя величина накопленного заряда на сантиметр длины строу  $\sim 4,2 \text{ Кл}$ . Стрелкой показано направление продува строу

Таким образом, результаты радиационного тестирования облучением  $\gamma$ -квантами с энергией 8 кэВ показали возможность долговременной работы строу высокого давления в переходном режиме.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование переходного режима от слаботочкового к сильноточковому для строу с газовым наполнением  $\text{ArCO}_2$  при давлении 3 бар показало возможность его применения для высокоточной регистрации заряженных частиц. Переходной режим работы строу в этом диапазоне давления и при аноде диаметром 30 мкм или менее не развивается в самогасящийся стримерный режим, обладает высокой стабильностью и достаточно хорошей радиационной стойкостью.

Авторы благодарны В. И. Давкову за участие в проведении исследований по радиационному старению.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abat E. et al.* The ATLAS TRT End-Cap Detectors // JINST. 2008. V. 3. P. 10003.
2. *Buchkov V. N. et al.* The Large Size Straw Drift Chambers of the COMPASS Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 556. P. 66–79.
3. *Alves A. Augusto et al.* The LHCb Detector at the LHC // JINST. 2008. V. 3. P. S08005.
4. *Peshkhonov V. D.* New Capabilities of Coordinate Detectors on the Basis of Straws // PoS (ICHEP 2010), 2010. P. 508.
5. *Davkov V. I. et al.* Spatial Resolution of Thin-Walled High-Pressure Drift Tubes // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 634. P. 5–7.
6. *Bazylev S. N. et al.* A Prototype Coordinate Detector Based on Granulated Thin-Walled Drift Tubes // Ibid. V. 632. P. 75–80.
7. Paul Scherrer Institut. DRS4 Evaluation Board User's Manual. <http://drs.web.psi.ch/datasheets>.
8. *Алексеев Г. Д. и др.* Самогасящийся стримерный разряд в проволочной камере // ЭЧАЯ. 1982. Т. 13, № 3. С. 703–748.

Получено 26 августа 2013 г.