

P13-2004-155

В. М. Абазов, Г. Д. Алексеев, В. А. Баранов,  
Л. С. Вертоградов, Н. И. Журавлев, А. М. Калинин,  
В. А. Калинин, Е. В. Комиссаров, Н. П. Кравчук,  
Н. А. Кучинский, В. Л. Малышев, Ю. П. Мереков,  
С. И. Мерзляков, А. С. Моисеенко, А. А. Ноздрин,  
С. Ю. Пороховой, И. К. Прохоров, Б. М. Сабиров,  
А. А. Стахин, В. В. Токменин, Ю. Н. Харжеев,  
Н. В. Хомутов, А. А. Шишкин, Ю. А. Яцуненко

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ  
МИНИ-ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК  
ДЛЯ ПЕРЕДНЕЙ МЮОННОЙ СИСТЕМЫ  
УСТАНОВКИ D0

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Абазов В. М. и др.

P13-2004-155

Результаты испытания мини-дрейфовых трубок  
для передней мюонной системы установки D0

Приводятся описание процедур и результаты испытаний мини-дрейфовых трубок в ходе их производства для передней мюонной системы установки D0 (тэватрон, FNAL). Испытания, включающие в себя высоковольтную тренировку, проверку стабильности и однородности сигнала от рентгеновских гамма-квантов, измерение натяжения проволочек и проверку герметичности, позволяют быстро и эффективно тестировать детекторы в условиях массового производства таким образом, что финальная отбраковка трубок при сборке детекторной системы практически отсутствует.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2004

Abazov V. M. et al.

P13-2004-155

The Results of Mass Testing of the Mini-Drift Tubes  
for the D0 Forward Muon System

The procedure and results of mass testing of mini-drift tubes for the D0 forward muon system are described in detail. The mass testing includes high-voltage training, signal stability and uniformity check, wire tension and leak measurements. The tests organization provides fast and effective detector control in conditions of the mass production and negligible tube rejection in the detector system assembling.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2004

## ВВЕДЕНИЕ

В Объединенном институте ядерных исследований в рамках сотрудничества с FNAL [1] в 1998–1999 гг. было осуществлено массовое производство и испытание мини-дрейфовых трубок (МДТ) [2] — детекторов новой передней мюонной системы (FAMUS) модернизированной установки D0 (тэватрон, FNAL). Всего было изготовлено около 7000 трубок. Описание испытательных стендов, на которых проверялись МДТ, приведено в [3]. В данной работе представлено описание массовой проверки детекторов на этих стендах и полученных результатов.

Описание МДТ (см. рис. 1) и передней мюонной системы установки D0 приведены в работах [2, 3]. Каждый из трех суперслоев (*A*, *B*, *C*) трековой части передней мюонной системы разделен на восемь октантов. В октанте расположено три или четыре слоя МДТ. В слое каждая следующая трубка имеет длину на 8,5 см больше по сравнению с предыдущей. Длина трубок варьируется от 0,9 до 5,9 м. Трубке каждого слоя и длины присвоен соответствующий индекс, например «A10R27» — МДТ для суперслоя *A*, тип 10, правая, порядковый номер 27. Правая и левая конфигурации МДТ различаются расположением концевых заглушек трубок для удобства соединения их в слое для газового продува.

После прохождения производственного цикла собранная, но не загерметизированная трубка (пенал заварен только с одного торца пассивной заглушкой) поступает в проверочную зону. Здесь еще заполненная воздухом МДТ проходит первичную стадию проверки — измерение натяжения проволочек и предварительное высоковольтное испытание. После этого трубка герметизируется (заваривается активная заглушка), заполняется проверочным газом

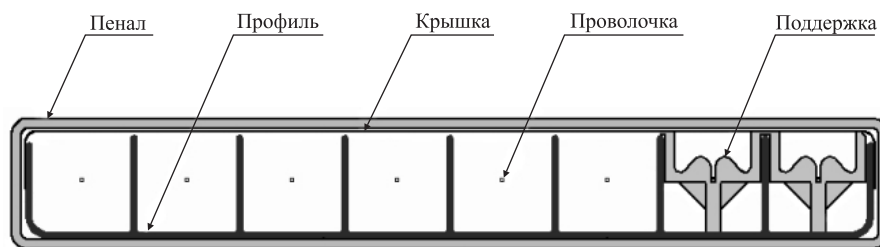


Рис. 1. Вид сечения МДТ (поддержка анодных проволочек изображена в двух крайних ячейках): пенал — ПВХ-пластик 1 мм, профиль — алюминий 0,6 мм, крышка — нержавеющая сталь 0,15 мм, проволочка — золоченый вольфрам  $\varnothing$  50 мкм, проволочная поддержка — полиэтилен 5 мм (вдоль проволочки)

и проходит высоковольтную тренировку и проверку однородности сигнала. Последним этапом является проверка герметичности.

## 1. ИЗМЕРЕНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОЛОЧЕК

Натяжение анодных проволочек в проволочных детекторах влияет на их стабильность и долговечность. Измерение натяжения проволочек необходимо и для контроля технологического процесса изготовления детекторов. Во время испытания пластиковых стримерных трубок (ПСТ) для адронного калориметра DELPHI [4] в процессе измерения натяжения проволочек применялся емкостный метод, при котором колебания проволочки внутри детектора, вызванные расположенным на трубке динамиком, приводили к изменению амплитуды наведенного сигнала на внешних электродах, также расположенных на трубке [5, 6].

В конструкции МДТ [7] в качестве катода применен алюминиевый профиль, закрытый сверху нержавеющей крышкой. Катод такой трубки «непрозрачен» для электрического сигнала по сравнению с катодом ПСТ, сделанным из пластика с высокоомным графитовым покрытием. В связи с этим был применен другой метод измерения натяжения проволочек. Основная идея этого метода заключается в изменении емкости ячейки, включенной в электрический контур при вынужденных механических колебаниях анодной проволочки, в результате которых в контуре возникает электрический ток.

На трубку подается высокое напряжение  $\sim 1000$  В. Это напряжение значительно ниже того, при котором возникает самоподдерживающийся разряд в такой конфигурации ( $\sim 3$  кВ). Емкость ячейки МДТ составляет  $\sim 10$  пФ/м. На трубку устанавливается динамик, подсоединенный к звуковой карте персонального компьютера, которая позволяет генерировать синусоидальные колебания звуковой частоты от 0,2 до 390 Гц. Динамик вызывает механические колебания анодных проволочек, приводящих к индуцированию электрического тока из-за изменения емкости в системе анод–катод. Возникающий электрический сигнал ( $\sim 100$  нА на сопротивлении 1 МОм) усиливается, и соответствующее напряжение оцифровывается амплитудно-цифровым преобразователем. При совпадении частоты принудительных колебаний анодной проволочки с частотой ее собственных колебаний происходит резонансное усиление амплитуды колебаний, которое регистрируется аппаратурой. По резонансной частоте определяется натяжение проволочки.

Алюминий, из которого сделан катодный профиль, и вольфрам, из которого изготовлена анодная проволока, имеют значительно различающиеся коэффициенты линейного теплового расширения:  $23,3 \cdot 10^{-6}$  и  $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$  соответственно [8]. Поскольку длина профиля и проволочек в трубке практически одинаковая, то при колебаниях температуры возникает заметное из-

менение натяжения проволочек, которое определяется отношением коэффициентов линейного теплового расширения алюминия и вольфрама и составляет  $\sim 5$ .

Это приводит к изменению натяжения анодных проволочек трубки на 1,4 г/градус. При изменении температуры на 10 градусов натяжение уже изменится на 14 г, что составит 7% по отношению к номинальному натяжению (200 г).

Детекторы эксплуатируются в условиях, при которых колебания температуры малы. Изменения температуры могут оказывать воздействие на натяжение проволочек лишь во время производственно-проверочного цикла и во время их транспортировки морским путем из Дубны к месту сборки и установки мюонной системы в FNAL. Для сравнения измерений, проводившихся при разных температурах, была применена нормировка на температуру 20 °С.

Номинальное натяжение для анодных проволочек выбрано 200 г, а диапазон допустимых натяжений  $\pm 50$  г от номинального. На рис. 2 приведено графическое отображение (на экране монитора) измерения натяжения проволочек одной из трубок. С левой стороны указаны номера проволочек, а с правой приведены значения их натяжения и резонансной частоты. Звездоч-

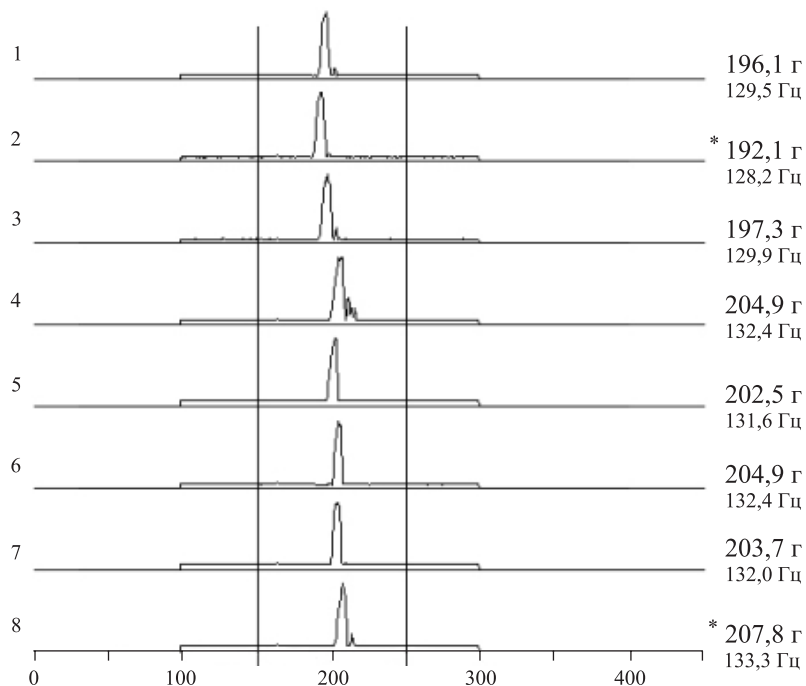


Рис. 2. Визуализация измерения натяжения проволочек

ками отмечены минимальное и максимальное натяжения проволок в этой трубке.

На рис. 3 приведена гистограмма натяжений всех проволок для прошедших испытания трубок. Распределение имеет небольшую асимметрию с левой стороны. Фитирование симметричной верхней части этого распределения функцией Гаусса дает среднее натяжение 208 г и сигму 10 г. Аналогичное фитирование для распределений минимального и максимального натяжений в каждой трубке дают значения среднего 199 и 217 г и их сигмы 9 и 8 г соответственно. Средние значения натяжений для каждого типа трубки в каждом из трех суперслоев (*A*, *B* и *C*) суммированы в графике на рис. 4. Из графика видно, что какая-либо систематическая зависимость натяжения проволок от длины трубок, связанная с технологией производства, отсутствует.

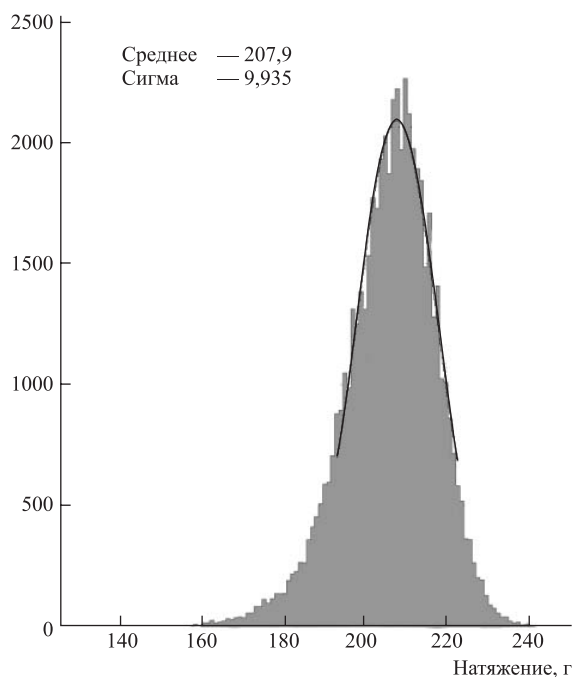


Рис. 3. Распределение натяжения проволок в МДТ

Этот тест также позволяет выявить и неправильное размещение проволочных поддержек в трубке. При правильном их размещении расстояния между фиксированием проволок одинаковые. В случае неправильного размещения какой-либо поддержки возникают разные свободные длины у проволок и на картинке визуализации измерения наряду с основными резонансными пиками появляются дополнительные небольшие пики.

Как уже отмечалось выше, трубка проходит эту проверку в незагерметизированном виде. Это позволяет в случае выявленных дефектов в натяжении или распайки проволочек легко разобрать трубку и либо устранить дефект, либо произвести установку новых анодных проволочек.

Все трубки после транспортировки их из Дубны в FNAL вновь проходили проверку натяжения проволочек. Сравнение измерений натяжения в Дубне и FNAL, проведенных для индивидуальных проволочек с разницей в несколько месяцев, отражено на гистограмме рис. 5. Видно, что в практическом смысле натяжение не изменилось.

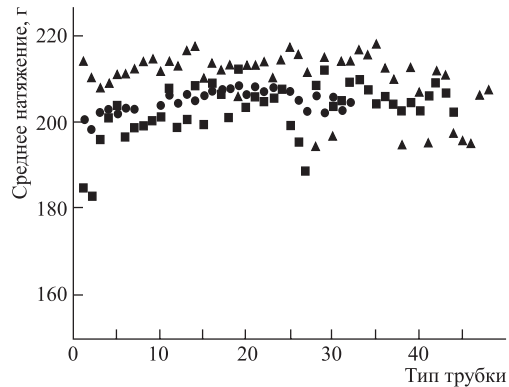


Рис. 4. График среднего натяжения для каждого типа трубки в разных суперслоях: ● — суперслой A; ■ — B; ▲ — C

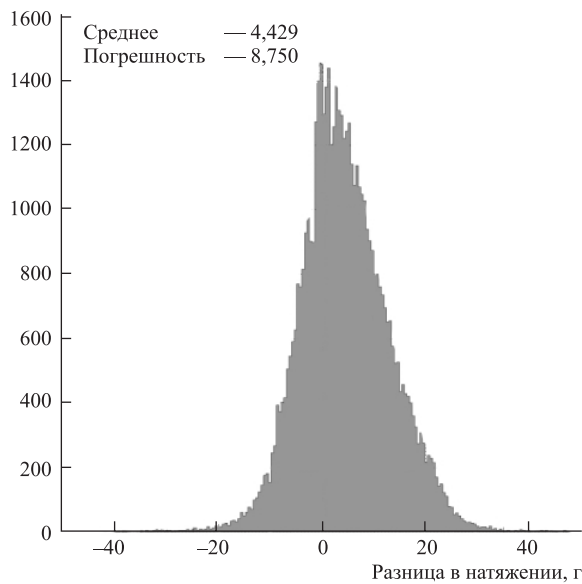


Рис. 5. Разница между натяжением проволочек, измеренным в Дубне и FNAL

## 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОЕ ИСПЫТАНИЕ

После прохождения проверки натяжения проволочек хорошая трубка поступает на стенд проверки однородности сигнала, где она проходит предварительную проверку с высоким напряжением. Ток хорошей трубки, заполненной воздухом, остается равным темновому вплоть до величины высокого напряжения, при котором начинается самоподдерживающийся разряд. Эта величина зависит от свойств газовой смеси, от конфигурации ячейки трубки и электрического поля в ней и не должна зависеть от длины трубки. Для МДТ данная величина составляет  $\sim 2,8-2,9$  кВ.

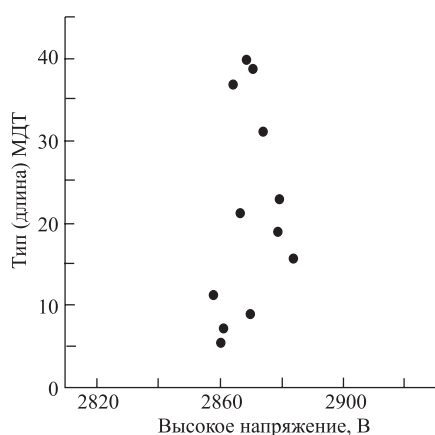


Рис. 6. Зависимость среднего напряжения, при котором начинается самоподдерживающийся разряд на воздухе, от типа (длины) трубки

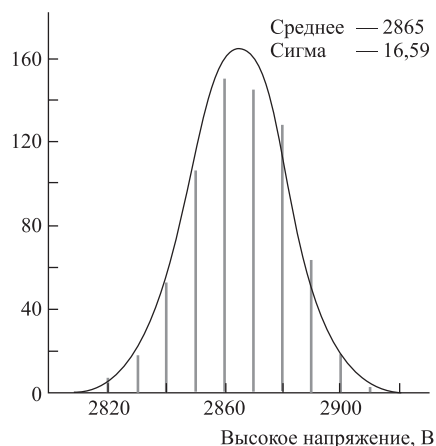


Рис. 7. Величина напряжения, при котором начинается самоподдерживающийся разряд в МДТ на воздухе, для всех типов МДТ

На рис. 6 приведен график зависимости среднего значения высокого напряжения, при котором возникает самоподдерживающийся разряд, от типа (длины) трубки. Измерения проведены для некоторых типов трубок, охватывающих большую часть всего диапазона их длин. Из этого графика видно, что величина данного напряжения находится примерно в диапазоне 2,86–2,88 кВ. Данные по всем измеренным типам трубок обобщены и фитированы распределением Гаусса (см. рис. 7). Видно, что они достаточно хорошо укладываются в это распределение. Средняя величина высокого напряжения, полученная фитированием, равна 2,865 кВ.

В ходе проверки при поднятии высокого напряжения от 0 до  $\sim 2,9$  кВ одновременно производится контроль тока в каждой ячейке трубки. Ячейки с теми или иными дефектами имеют значительное увеличение тока задолго



до достижения напряжения самоподдерживающегося разряда. На рис. 8 приведено графическое отображение (на экране монитора) проведения предварительного теста для одной из трубок, у которой одна из ячеек (№ 4) имеет дефект, результатом чего является рост тока в ячейке вместе с ростом высокого напряжения, начиная от  $\sim 1$  кВ.

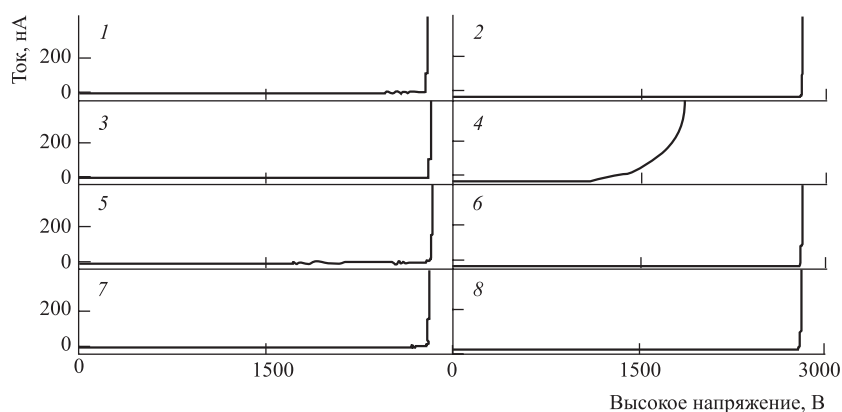


Рис. 8. Визуализация проведения предварительного высоковольтного испытания. Дефект в ячейке № 4 проявляется ранним ростом темнового тока

Обычно подобная ситуация связана с загрязнениями, попавшими в ту или иную ячейку во время сборки. Во всех остальных ячейках ток остается равным темновому вплоть до напряжения, при котором происходит резкий рост тока. В это время автоматически происходит сброс высокого напряжения для предотвращения возможных повреждений трубки и электроники. Во время проведения этого испытания ни одна трубка не была выведена из строя.

Дефекты, выявленные этой проверкой, также легко могут быть исправлены путем устранения загрязнений или переустановки проволоочки в соответствующей ячейке без окончательной отбраковки трубки.

После прохождения предварительных проверок у прошедших эти испытания трубок активная заглушка соединяется путем термосварки с пеналом, и полностью собранные трубки проходят дальнейшие испытания.

### 3. ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ТРЕНИРОВКА

Темновой ток дрейфовой трубки определяется в основном токами утечки. Средний ток от сигналов, даваемых космическими лучами для МДТ максимальной длины ( $\sim 6$  м), составляет  $\sim 0,2$  нА и пренебрежимо мал по

сравнению с характерным полным темновым током, измеряемым в трубках (1–10 нА). Измерение темнового тока детектора и отслеживание его поведения при поднятии напряжения от нулевого до максимально возможного и нахождении детектора в течение некоторого времени при рабочем напряжении дает предварительную информацию о качестве сборки трубки и ее способности работать в течение длительного времени.

В МДТ передней мюонной системы установки D0 применяется газовая смесь  $\text{CH}_4 + \text{CF}_4 = 10 + 90\%$ . Она обеспечивает высокую скорость дрейфа электронов первичной ионизации ( $\sim 120$  мкм/нс), необходимую для регистрации сигналов МДТ в течение длительности стробирующего сигнала, равной 100 нс [7]. МДТ имеет ячейку квадратной геометрии  $9,4 \times 9,4$  мм с натянутой в середине проволочкой диаметром 50 мкм. Максимальное время дрейфа электронов первичной ионизации в дрейфовой ячейке с такими параметрами составляет  $\sim 60$  нс. Указанная газовая смесь является достаточно дорогой, и в D0 применяется система рециркуляции [9] с целью снижения объемов потребления смеси и, соответственно, денежных затрат.

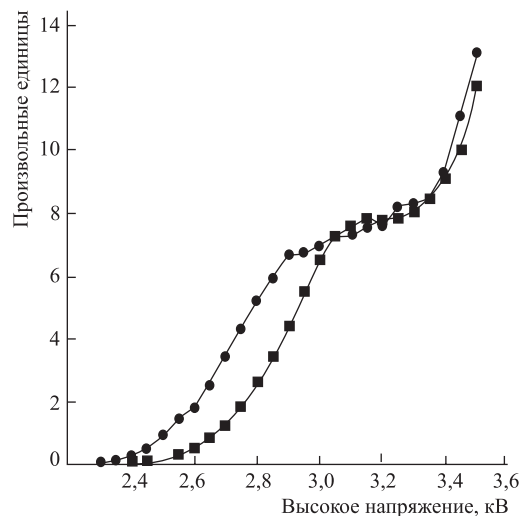


Рис. 9. Счетные характеристики МДТ с газовыми смесями: ● — рабочей и ■ — проверочной

С точки зрения проверки детекторов в ходе массового производства, рабочая смесь является слишком дорогой, и для тестов необходима другая смесь, которая была бы близка по своим рабочим характеристикам к рабочей смеси, но значительно дешевле. Поскольку счетная характеристика газоразрядного детектора указывает область стабильной работы детектора в зависимости от

высокого напряжения [10], то и основным критерием для выбора проверочной смеси было выбрано сходство счетных характеристик МДТ с проверочной и рабочей смесями.

В ходе поисков была выбрана проверочная смесь  $Ag + CO_2 = 10 + 90\%$  [11]. Она имеет скорость дрейфа электронов первичной ионизации  $\sim 60$  мкм/нс, что в два раза меньше по сравнению с рабочей смесью, но счетная характеристика МДТ с этой смесью незначительно отличается от счетной характеристики со штатной смесью (см. рис.9). Напряжение на МДТ в штатном режиме (с рабочей смесью) выбрано 3,2 кВ. Тестовая газовая смесь позволяет поднимать напряжение до величины 3,4–3,5 кВ при условии, что ток трубки остается на темновом уровне. Это граничное напряжение значительно превышает рабочее напряжение.

В ходе проверки группа трубок (30–60 шт.) продувается тестовой газовой смесью. После достаточного продува, кратного трем сменам объема, на трубках производится постепенный подъем высокого напряжения. Весь диапазон высокого напряжения разбит на несколько поддиапазонов, в каждом из которых устанавливается своя скорость подъема напряжения. Это позволяет значительно оптимизировать высоковольтную тренировку по времени: быстро пройти диапазоны малых напряжений (частично проверенных на предыдущих испытаниях) и более детально проверить диапазоны высоких напряжений. После каждого шага увеличения напряжения происходит поочередное измерение тока в каждой трубке и отображение результатов сканирования на мониторе компьютера [3].

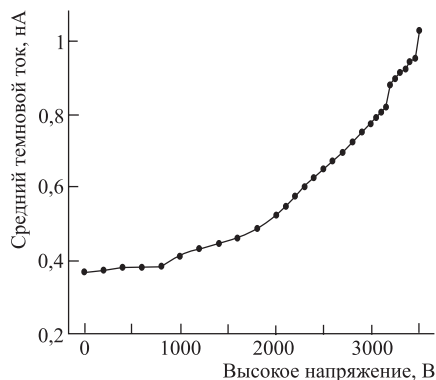


Рис. 10. Средний темновой ток МДТ в зависимости от напряжения

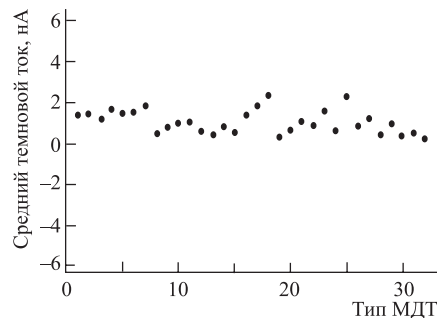


Рис. 11. Зависимость среднего темнового тока МДТ от типа (длины) трубки для суперслоя А

При появлении трубок с большим током происходит повторное сканирование токов. Если ток в какой-либо трубке не уменьшается или продолжает расти с увеличением напряжения, то такая трубка отбраковывается и

отключается от высокого напряжения. Все остальные трубки проходят увеличение напряжения до максимально возможной величины и затем находятся

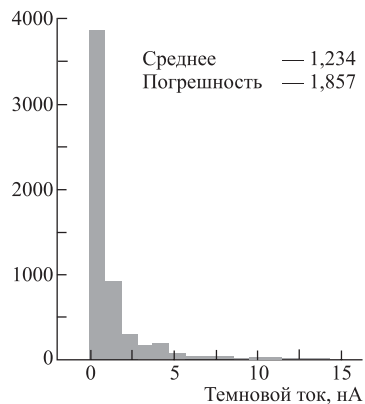


Рис. 12. Распределение темнового тока проверенных трубок при напряжении 3,2 кВ

определенное время при рабочем напряжении. На рис. 10 представлен график среднего темнового тока в зависимости от высокого напряжения для всех протестированных трубок.

Величина темнового тока не зависит от длины трубки, так как определяется токами утечки. Это хорошо видно на графике зависимости среднего темнового тока от типа (длины) трубки для суперслоя А (рис. 11) при напряжении 3,2 кВ. Распределение тока всех проверенных трубок при напряжении 3,2 кВ представлено на рис. 12. Аналогичные распределения при других напряжениях имеют схожий вид.

Все МДТ, чей ток в ходе тренировки не превысил допустимую величину (25 нА), герметизируются: газовые разъемы закрываются специальными заглушками — и заполненные тестовой смесью поступают на следующее за этим тестирование однородности сигнала.

Отбраковка на этом этапе тестирования составила 2 %.

#### 4. ПРОВЕРКА ОДНОРОДНОСТИ СИГНАЛА

После получения информации о темновом токе трубки проверяются в условиях высокой радиационной загрузки. Суть этой проверки состоит в том, что каждая МДТ облучается через коллиматор источником гамма-квантов, расположенным на движущейся над детектором тележке. Одновременная с движением источника регистрация тока трубки и сопоставление с его текущей координатой тележки позволяют построить картину отклика (сигнала) трубки на ее локализованное облучение. Это дает возможность оценить однородность отклика трубки в условиях плотной загрузки, превосходящей рабочую на несколько порядков, выявить и локализовать возможные аномалии в работе проверяемого детектора, а также определить количество и правильность расположения поддержек проволоочек в трубке.

Расчеты загрузки передней мюонной системы показывают, что средняя максимальная загрузка для МДТ (в ближнем к месту соударения пучков суперслое А) при светимости  $2 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  составляет  $\sim 30 \text{ частиц} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [12]. Ток для одной проволоочки МДТ длиной 3 м при такой загрузке составит



Среднее значение гистограммы составляет  $\sim 10\%$ , а среднеквадратичное отклонение  $4\%$ . Гистограмма для распределения отклонения амплитуды тока

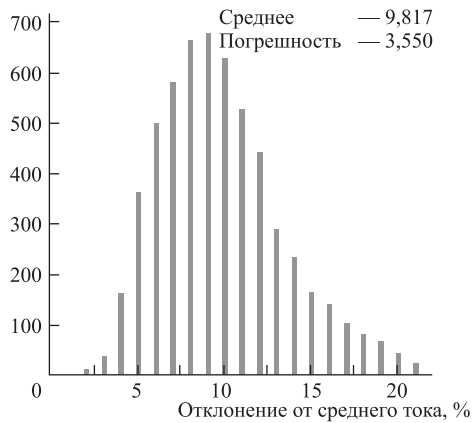


Рис. 14. Суммарная гистограмма отклонений от среднего тока в меньшую сторону

значительном отклонении от центрального положения, что определяется технологией сборки МДТ.

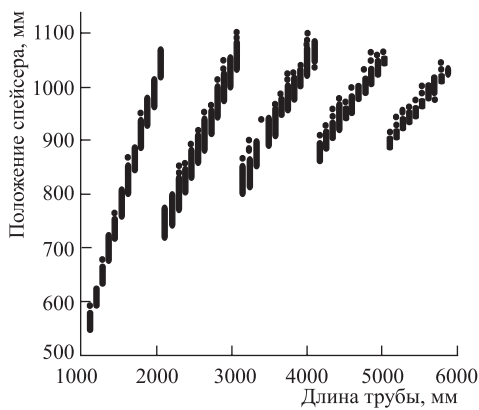


Рис. 15. Положение первой поддержки провололок в зависимости от длины (типа) трубки

«размазывание» положения спейсера ( $\pm 1-1,5$  см) определяется технологией массовой сборки и не влияет на работоспособность МДТ.

от среднего значения в большую сторону дает значение среднего  $13\%$  и среднеквадратичное отклонение  $5\%$ .

Поддержки анодных провололок (спейсеры) устанавливались в трубках по определенному алгоритму в зависимости от длины трубки таким образом, чтобы свободное расстояние между фиксированием провололок не превышало  $\sim 1$  м. При заметно большем расстоянии между поддержками в ячейках данной геометрии при рабочем напряжении может возникать электростатическая неустойчивость провололок: они могут притянуться катодом при не-

Результаты измерения положения одной из поддержек (первой от активной заглушки) в трубках, полученные при проверке однородности сигнала, отражены на рис. 15. Хорошо видно, что при увеличении длины трубки на каждый метр значение положения поддержки периодически падает и вновь начинает увеличиваться. Данное поведение является результатом того, что добавляется еще одна поддержка, а длина трубки делится таким образом, чтобы расстояние между всеми поддержками в трубке было одинаковым. Характерное «разма-

На проверку однородности сигнала трубки попадают после трех предыдущих тестов: проверки натяжения анодных проволочек, предварительной высоковольтной проверки и высоковольтной тренировки, — в ходе которых выявляются практически все возможные серьезные дефекты сборки детекторов. Поэтому отбраковка в данном тесте имеет место лишь в том случае, если какая-либо проволочка или поверхность катода имеют незначительные дефекты, не проявившиеся в предыдущих тестах интегральных характеристик, но которые сказываются при локальном интенсивном облучении, а также если положение спейсеров значительно отличается от номинала.

## 5. ПРОВЕРКА ГЕРМЕТИЧНОСТИ

Герметичность газоразрядных детекторов имеет большое значение, поскольку низкий ее уровень приводит к потере рабочей газовой смеси и проникновению воздуха в газовую систему. Объем газа МДТ передней мюонной системы равен  $\sim 18 \text{ м}^3$ . Более 6000 трубок входят в эту систему в составе 48 октантов. Скорость продува системы составляет 6 л/мин, что дает смену половины объема в сутки. Избыточное входное давление газа в системе равно 10 см водяного столба. Допустимые потери во всей данной системе определены в 5% за сутки. Исходя из этих условий определена предельно допустимая величина течи для одной трубки. Она составляет 3,5 Па/мин.

В ходе проверки на течи каждая МДТ подсоединяется к баллону с газом и измерителю избыточного давления. В трубку подается необходимое избыточное давление, и после его выравнивания в этой системе засекается скорость падения давления. Трубки с течью, превышающей допустимый предел, проходят дополнительную герметизацию и повторную проверку. В результате этой проверки отбраковываются лишь те трубки, которые имеют большие течи, являющиеся результатом механических повреждений при производстве или транспортировке.

## 6. ПРОВЕРКА МДТ В FNAL

Как уже отмечалось, все детекторы после завершения массового производства были доставлены из Дубны в FNAL к месту сборки модулей передней мюонной системы. Транспортировка детекторов осуществлялась в контейнере морским путем в течение примерно одного месяца.

Перед сборкой модулей мюонной системы в FNAL все МДТ вновь прошли через систему проверок. В здании, где проводилась сборка модулей,

были установлены специализированные испытательные стенды для МДТ по аналогии со стендами в Опытном производстве ОИЯИ. Они частично повторяли стенды в Дубне и вместе с тем имели отличия в идеологии испытаний и конструкции.

Как уже отмечалось в разд. 1, были проведены новые проверки натяжения анодных проволочек. После этого теста трубки группами размещались на стенде, который позволяет проводить автоматизированную проверку темнового тока трубок, а также измерения скорости счета космических частиц на проверочной газовой смеси того же состава.

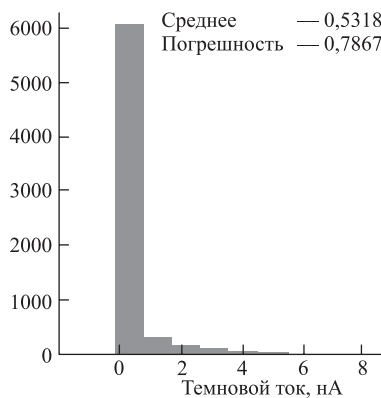


Рис. 16. Распределение темнового тока при напряжении 3,2 кВ, полученное в FNAL

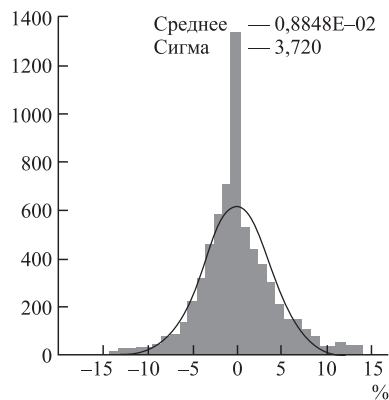


Рис. 17. Отклонение скорости счета МДТ для космики от табличного значения (проверка трубок в FNAL)

В начале проверки в группе трубок измерялся их темновой ток, также как и в Дубне, а затем при рабочем напряжении 3,2 кВ и пороге регистрации 2 мкА производилось измерение скорости счета частиц и определялось отклонение этой величины для каждой трубки от расчетного табличного значения для космики. Выбранные пределы отклонения для отбраковки трубки составляли  $\pm 15\%$ .

На рис. 16 представлена гистограмма распределения тока для всех проверенных трубок при напряжении 3,2 кВ. Сравнение этого распределения с аналогичным распределением, полученным в Дубне (см. рис. 12), показывает, что средний темновой ток трубок уменьшился. Это может быть вызвано разной влажностью, как проверочного газа, так и воздуха в зале, где проводились испытания.

На рис. 17 приведена суммарная гистограмма отклонения интенсивности регистрации частиц от табличного значения для всех проверенных трубок,



фигурирующая нормальным распределением (Гаусса). Отличительной (хорошей) особенностью данного распределения является то, что отклонения от табличных значений весьма малы ( $\pm 3,7\%$ ), а значительная часть детекторов попадает в «ноль». Это означает, что детекторы, собранные по данной технологии для работы на высокой светимости тэватрона, в принципе могут использоваться даже в низкофоновых экспериментах.

Последним испытанием была повторная проверка герметичности трубок. Ее результаты приведены на рис. 18. Видно, что на практике достигнута индивидуальная герметичность МДТ, на порядок превышающая требования эксперимента.

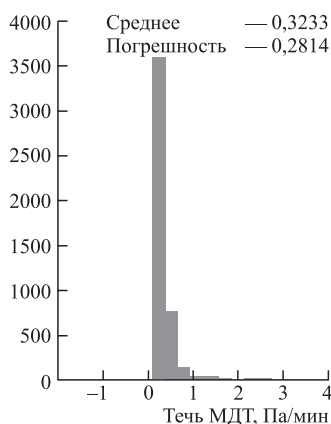


Рис. 18. Результаты измерения течей МДТ, полученные в FNAL

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенное описание организации проверки МДТ и полученных результатов показывает, что все важные рабочие параметры детекторов контролировались в ходе их массового производства, а также перед сборкой модулей мюонной системы D0.

Подобная организация проверок МДТ позволила достичь высокой надежности изготовленных детекторов. После 2,5 лет работы модернизированной экспериментальной установки D0 количество мертвых каналов МДТ в передней мюонной системе не превысило 0,27 %, при этом 0,16 % появилось в ходе сборки модулей системы и их монтажа в установке.

Авторы выражают благодарность В. И. Данилову и всему коллективу Опытного производства, участвовавшему в производстве МДТ, за качественное и своевременное выполнение работ.

Авторы признательны Д. С. Денисову, Т. Жао, Л. Шгутте и всему коллективу коллаборации D0 за помощь и сотрудничество.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Участие ОИЯИ в физической программе модернизированного тэватрона в Фермилаб (проекты D0, CDF). Тема 02-0-1022-97/2005. Проблемно-тематический план научно-исследовательских работ и международного сотрудничества Объединенного института ядерных исследований на 2003 год. Дубна, 2002.

2. *Abramov V. et al.* Forward muon system for the D0 detector upgrade // Nucl. Instr. Meth., Sect. A. 1998. V. 419. P. 660–666.
3. *Абазов В. М. и др.* Стенды испытания мини-дрейфовых трубок. Препринт ОИЯИ Р13-2003-198. Дубна, 2003.
4. DELPHI Collaboration. The DELPHI detector at LEP // Nucl. Instr. Meth., Sect. A. 1991. V. 303. P. 233–276.
5. *Алексеев Г. Д. и др.* Автоматизация стендов тренировки и испытания стримерных трубок для адронного калориметра установки ДЕЛФИ. Сообщение ОИЯИ Р13-90-276. Дубна, 1990.
6. *Alexeev G. D. et al.* The results of mass testing of the plastic streamer tubes for the DELPHI hadron calorimeter // Nucl. Instr. Meth., Sect. A. 1991. V. 305. P. 344–353.
7. *Alexeev G. et al.* Technical Design Report for the DØ forward muon tracking detector based on mini-drift tubes, D0 Note 3366. Fermilab, 1997.
8. Физические величины: Справ. М.: Энергоатомиздат, 1991.
9. *Zhao T. et al.* D0-Forward Angle Muon Tracking Detector and Its Gas System // IEEE Transactions In Nuclear Science. 2002. V. 49, No. 3.
10. *Фюнферт Э., Нейерт Г.* Счетчики излучений. М.: Госатомиздат, 1961.
11. *Kamyshkov Y. et al.* The self-quenching streamer discharge in Ar-CO<sub>2</sub> mixtures // Nucl. Instr. Meth., Sect. A. 1987. V. 257. P. 125–131.
12. *Sirotenko V.* Progress on D0 Detector Shielding Optimization with GCALOR, D0 Note 2835. Fermilab, 1/23/96.

Получено 4 октября 2004 г.

Редактор *О. Г. Андреева*

Подписано в печать 10.12.2004.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,28. Тираж 335 экз. Заказ № 54694.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)