

УДК 539.1.074.23

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВОГО ФИЛЬТРА В ЗАМКНУТОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS

© 2012 г. В. Г. Бондаренко, **Б. А. Долгошеин**, С. П. Коновалов, В. А. Крамаренко*,
И. А. Кудряшов*, А. Н. Ларичев*, И. С. Маркина, В. В. Сосновцев, С. И. Сучков

*Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 117312, Москва, Каширское ш., 31*

**НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Россия, 119992, Москва, Воробьевы горы, 1, стр. 2*

Поступила в редакцию 17.06.2011 г.

Приведены результаты исследований газового фильтра в циркуляционной системе детектора переходного излучения установки ATLAS. Описаны прототип циркуляционной газовой системы и методика исследования радиационного старения в ней. Измерена скорость радиационного старения в системе без газового фильтра и с ним.

ВВЕДЕНИЕ

Трековый детектор переходного излучения TRT (Transition radiation tracker) является одним из трех детекторов, образующих внутренний координатный детектор установки ATLAS, созданной в CERN для изучения фундаментальных физических процессов на пучке Большого адронного коллайдера LHC (Large Hadron Collider).

В детекторе переходного излучения используются газовые дрейфовые трубки диаметром 4 мм, изготовленные по специальной технологии из полиимидной пленки [1]. Пространственное разрешение детектора 150–170 мкм при пороге регистрации ~300 эВ. Детектор регистрирует фотоны переходного излучения (~6 кэВ), возникающие в радиаторе между слоями дрейфовых трубок. Общее количество каналов регистрации 420000 [2]. Внутренний детектор находится в области сильных радиационных нагрузок. Каждая дрейфовая трубка за 10 лет работы LHC получит 10 Мрад и 10^{14} нейтронов/см². Это соответствует суммарному заряду 10 Кл или 100 нА на 1 см длины каждой дрейфовой трубки.

Для эффективной регистрации переходного излучения в дрейфовых трубках используется газовая смесь на основе ксенона Xe(70%) + CO₂(27%) + O₂(3%), обеспечивающая высокую скорость дрейфа электронной компоненты сигнала и стабильную работу детектора в достаточно широком диапазоне рабочих напряжений [3, 4]. Используемая газовая смесь не содержит органических компонент, поэтому процессы отложения органики на анодах дрейфовых трубок сильно подавлены и возможны только за счет органических за-

грязнений в газовой системе. Химически активные радикалы кислорода, возникающие в этой газовой смеси в области пропорционального разряда вблизи сигнальной нити, взаимодействуя с гидрокарбонами, разрушают отложения органики на сигнальных нитях. Однако эта газовая смесь оказалась чувствительной к органосилоновым примесям [3, 5], поскольку радикалы кислорода слабо взаимодействуют с силиконовыми отложениями на сигнальных нитях. В связи с этим требования к чистоте газовой системы и газовой смеси очень высоки. Примеси в газе могут возникать от дегазации силиконовых соединений, содержащихся в материалах как газовой системы, так и детектора. Следует заметить, что материалы, содержащие органосилоксаны, широко используются в современных газовых приборах в виде различных силиконовых масел и смазок.

Использование в детекторе дорогостоящего газа обусловило необходимость создания замкнутой газовой системы циркуляционного типа. Существуют два метода борьбы с примесями в такой системе: жесткий контроль и отбор по чистоте элементов в процессе монтажа газовой системы и использование специального фильтра для поглощения примесей. В качестве таких фильтров обычно используют твердые гранулированные микропористые материалы с разветвленной поверхностью [6]. Преимущество таких материалов заключается в том, что они работают при комнатных температурах и не требуют применения дополнительных источников энергии. Кроме того, они обладают высокой объемной плотностью, оказывают малое сопротивление газовому потоку и образуют мало пыли. Размеры гранул адсорбента и размеры

фильтра обычно выбирают опытным путем. Для обеспечения ламинарности газового потока диаметр фильтра должен быть в 10 раз больше размера гранул, а для обеспечения эффективности очистки длина фильтра должна быть в 5 раз больше его диаметра [7].

В данной работе исследуется адсорбент — катализатор ГТТ, разработанный в МГУ. Катализатор изготавливается в виде гранул пористого материала — алюмосиликата, покрытого окислами металлов: оксидом марганца, оксидом меди и оксидом никеля. Гранулы имеют цилиндрическую форму диаметром 1 мм и длиной 2–4 мм. Объемная плотность катализатора 0.63 г/см³, ориентировочная цена 45\$ за килограмм. В промышленности этот катализатор используется для разложения озона [8], а в газовой системе детектора TRT озон образуется вблизи сигнальной проволоки детектора. Помимо разложения озона, окислы металлов поглощают органические и силиконовые примеси. Катализатор можно регенерировать при температуре 300°C.

Ниже даны оценки эффективности химического фильтра для очистки газовой смеси и приемлемо-возможной концентрации загрязнения газовой системы и прототипов с использованием дополнительного источника примесей Si. Приведены результаты исследования работы прототипа газовой циркуляционной системы с реальным модулем боковой части детектора переходного излучения (End-Cap TRT) и эффектов радиационного старения детектора в условиях, приближенных к условиям работы установки ATLAS.

ПРОЦЕДУРА ПОДГОТОВКИ К ИЗМЕРЕНИЯМ

Все элементы газовой системы подвергались очистке в ультразвуковой ванне с изопропиловым спиртом с последующей сушкой. Чистка детектора осуществлялась длительным продувом CO₂. Все элементы газовой системы, включая детектор, были проверены на содержание примесей.

Проверка состояла в следующем: газовая смесь, циркулирующая в замкнутой системе, направлялась в облучаемую рентгеновским источником мониторинную дрейфовую трубку, после чего — в атмосферу. Чистота газа и содержание примесей оценивались по падению амплитуды сигнала (старению) в облучаемой мониторинной дрейфовой трубке.

Для проверок была выбрана газовая смесь Ag/CO₂ с целью экономии дорогостоящего ксенона. Чистота газовой системы проверялась так же, как и в CERN при исследованиях чистоты элементов газовой системы [3, 4]. Чистая газовая смесь Ag/CO₂ продувалась через проверяемые элементы газовой системы, а затем — через мониторинную дрейфовую трубку, которая облучалась

рентгеновским источником. Поток газа через детектор составлял 1.5 см³/мин, плотность ионизации — 100 нА/см. За время облучения 250 ч, что соответствует 2000 ч работы детектора в рабочих условиях, не было зарегистрировано изменений амплитуды мониторинной дрейфовой трубки при 2%-ной точности измерений.

Перед наполнением рабочей газовой смесью система вместе с детектором продувалась CO₂ в течение ~3 сут. Затем газовая система наполнялась и продувалась в атмосферу рабочим газом Xe(70%) + CO₂(27%) + O₂(3%) до тех пор, пока содержание влаги не превысит 2000 ppm. После этого в газовую систему вводился источник загрязнений, система закрывалась, и включалась циркуляция.

ЦИРКУЛЯЦИОННАЯ ГАЗОВАЯ СИСТЕМА

Для проведения исследований в МГУ был создан прототип замкнутой циркуляционной системы. Схема газовой системы приведена на рис. 1. Система полностью собрана из элементов, которые используются в газовой системе детектора переходного излучения. Все газовые соединители типа Gyrolok, газовые трубы и вентили выполнены из нержавеющей стали. Основное отличие этой системы от газовой системы детектора TRT установки ATLAS состоит в том, что в ней нет системы удаления CO₂ и миксера для дозирования газовых компонент. Используется предварительно приготовленная газовая смесь в баллоне.

Циркуляционный насос мембранного типа выполнен из нержавеющей стали. Мембрана и клапаны изготовлены из фторполимерной резины типа VITON. Насос обеспечивает регулируемый поток газа до 2 л/ч и способен работать до давлений 500 мбар. Два демпфирующих объема служат для снятия пульсации потока, вызванной работой насоса, и для защиты элементов системы при резком изменении давления внутри системы.

Капиллярный измеритель потока. Циркуляционная система создавалась для экспериментов с различными газовыми смесями, в том числе содержащими SF₆. В связи с этим в системе не применялись стеклянные ротаметры, так как стекло разъедается активными фтористыми соединениями, возникающими при ионизации.

Измеритель циркуляционного потока собран на капилляре из нержавеющей стали. Падение давления Δp в капилляре измеряется дифференциальным датчиком и регистрируется компьютером. Поток рассчитывается по известной формуле Хагена—Пуазейля [7]:

$$F = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \mu L},$$

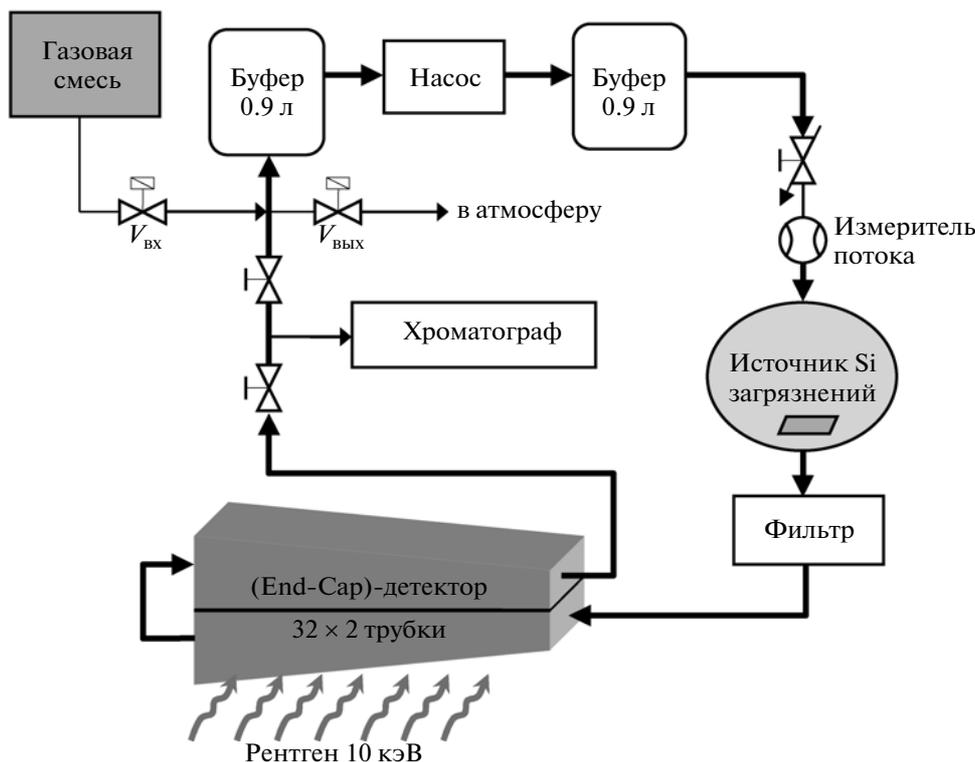


Рис. 1. Схема прототипа циркуляционной газовой системы. $V_{вх}$ и $V_{вых}$ — управляемые от компьютера электромагнитные клапаны.

где F — поток; R — радиус капилляра; L — длина капилляра; μ — динамическая вязкость газа.

Измерителем перепада давления служит тензодатчик MPX-5010D, рассчитанный на диапазон измерений 0–100 мбар. Информация с него поступает в АЦП микроконтроллера AT90S8515, после чего — в компьютер.

Фильтр. Корпус фильтра для чистки газовой смеси изготовлен из стальной нержавеющей трубки диаметром 10 мм и длиной 26 см. В фильтре используется адсорбент ГТТ. На входе и выходе установлены механические полипропиленовые фильтры, которые фиксируют гранулы адсорбента внутри фильтра и предотвращают попадание пыли из адсорбента в систему. Для оценки эффективности выбранного фильтра в систему был введен искусственный источник загрязнений. Он представляет собой кремнеорганический компаунд, который создает в газе небольшое парциальное давление силоксана. Небольшое количество компаунда, ~2 мм³, помещено в газовую трубку непосредственно перед фильтром. Предварительно была измерена мощность источника кремниевых примесей. На рис. 2 показано старение мониторинговой дрейфовой трубки, в которую поступает газ из источника кремниевых примесей. Силиконовые примеси источника вызывают радиационное старение в детекторе 1%/ч.

Детектор. Для опытов использовалась часть реального бокового (End-Cap)-детектора переходного излучения, состоящего из двух секций, содержащих по 32 дрейфовые трубки. Секции продувались последовательно, трубки располагались в четыре слоя. Дрейфовые трубки с внешней стороны обдувались углекислым газом для предотвращения попадания атмосферной влажности в детектор и в газовую систему. Общий вид детектора показан на рис. 3.

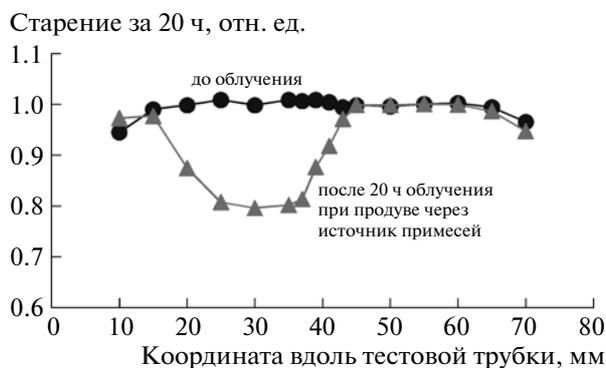


Рис. 2. Изменение профиля сигналов дрейфовой трубки за 20 ч работы при наличии источника примесей. Поток газа Ar/CO_2 — 1.5 см³/мин, плотность ионизации — 100 нА/см, зона облучения — 20 мм.



Рис. 3. Фотография детектора в установке. Стрелками указано направление газового потока.

РЕЖИМ РАБОТЫ ГАЗОВОЙ СИСТЕМЫ

Давление внутри газовой системы поддерживалось в диапазоне 10–14 мбар относительно атмосферного. Влажность газа на входе в детектор была меньше 2000 ppm. Средний поток циркуляции составлял 0.3 л/ч, что соответствовало рабочему потоку в каждой дрейфовых трубке детектора 0.15 см³/мин. Процентный состав и утечки газовой смеси периодически измерялись. Утечка газа (рис. 4) составила 1.6 см³/ч, т.е. газ в системе полностью меняется в течение 1550 ч. При таких утечках процентный состав газовой смеси не меняется и составляет Xe(1.56%) + CO₂(0.59%) + O₂(0.97%).

Для сравнения, при утечке 2 л/ч в рабочей газовой системе детектора TRT установки ATLAS полная замена газовой смеси произойдет за то же самое время, 1500 ч. В этом случае изменение процентного состава может быть легко скорректировано миксером без использования системы удаления CO₂.

Чтобы сделать корректные оценки для реальной системы очистки детектора TRT установки ATLAS, соотношение объемов газовых систем и объемов фильтров в исследованной и реальной системах должно быть примерно равным. Отношение объемов для газовой системы, разработанной в МГУ (в кубических сантиметрах), составляет 2520/20 = 126, а для реальной газовой системы TRT (в литрах) – 3000/20 = 150. В результате масштаб тестов для испытания фильтра примерно равен 1:1.

Детектор TRT облучался рентгеновской трубкой. Энергия γ -квантов 6–10 кэВ. Вместе с рент-

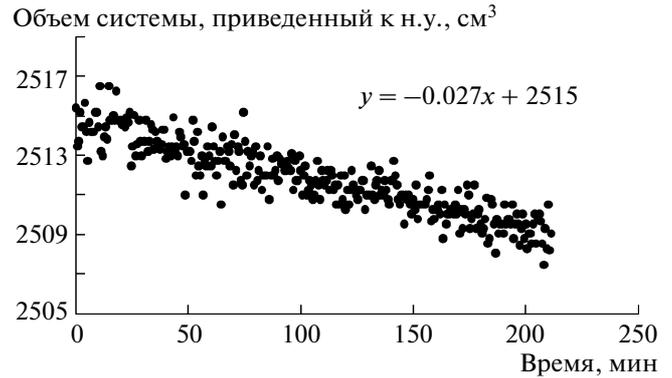


Рис. 4. Утечки в газовой системе, включающей в себя TRT-детектор и фильтр.

геновской трубкой детектор при облучении был помещен в защитный кожух из свинца толщиной 5 мм. Геометрия облучения представлена на рис. 5.

Детектор облучался по всему объему. Распределение амплитуд в дрейфовых трубках детектора определялось с помощью второй рентгеновской трубки с коллиматором шириной 1 мм, которая была установлена на подвижной платформе снаружи свинцового кожуха. Во время сканирования передняя часть свинцового кожуха убиралась.

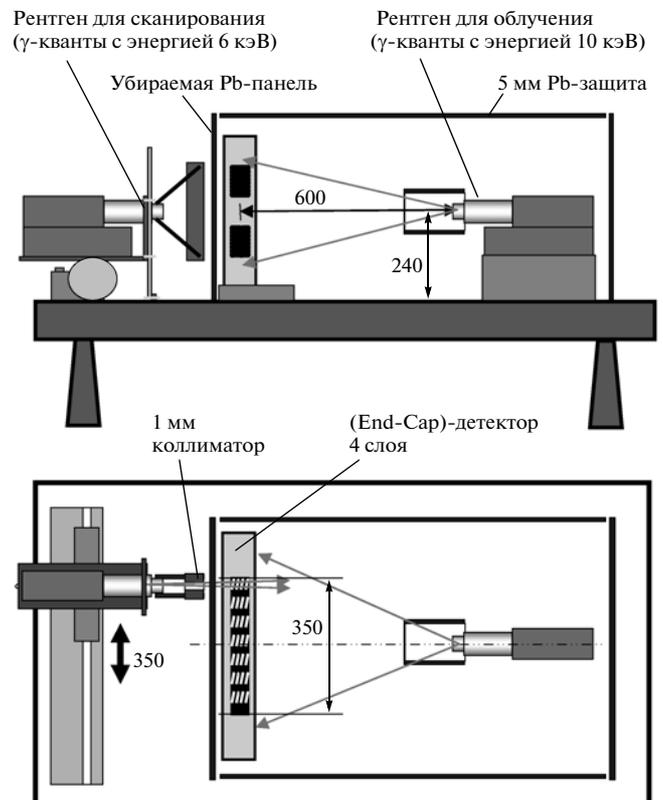


Рис. 5. Схема облучения и сканирования детектора.

Дрейфовые трубки в детекторе расположены в 4 слоя. Ксенон в дрейфовых трубках заметно поглощает γ -кванты, поэтому интенсивность облучения падает от слоя к слою, что хорошо видно из рис. 6.

РЕГИСТРИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Система регистрации имеет 12 каналов. Она состоит из 12 предусилителей, установленных на детекторе, зарядово-цифровых преобразователей типа LRS 2249A в стандарте CAMAC и логической триггерной электроники. Передача информации в компьютер осуществлялась контроллером типа А на шину ISA. Для контроля состояния газовой циркуляционной системы и ее управления была разработана микропроцессорная система контроля параметров. Она состоит из датчика давления внутри системы, датчика атмосферного давления, капиллярного датчика газового потока, управляемого электромагнитного вентиля и микроконтроллера AVR AT90S8515, связанного с компьютером по каналу RS232. Управляющая программа для микроконтроллера обеспечивает наполнение системы газовой смесью и коррекцию давления газа в системе с помощью электромагнитных вентилях.

Компьютерная программа, работающая в среде Borland CBuilder6, Windows 98/XP, позволяет управлять приемом спектрометрической информации и контролировать параметры газовой системы – газовый поток, давление в детекторе, температуру, атмосферное давление и количество газа в системе. Все измеряемые параметры и спектры отображаются на экране монитора в графическом виде и непрерывно регистрируются в базе данных в ходе опытов. Имеется возможность периодического контроля утечки газа, процентного состава и влажности рабочей газовой смеси.

Облучались все 64 дрейфовые трубки детектора переходного излучения. Один цикл облучения обычно составлял две недели, 350–360 ч, с последующим перерывом на 12 ч. После этого измерялись амплитудные спектры с 24 дрейфовых трубок детектора, из которых 8 дрейфовых трубок использовались как мониторинговые. Во время облучения на них было отключено высокое напряжение и, следовательно, в них не происходило старение.

При обработке информации применялась следующая процедура. Вычислялась наиболее вероятная амплитуда сигналов дрейфовых трубок. Для устранения влияния меняющихся в ходе длительных измерений внешних условий проводилась коррекция амплитуд по мониторинговым дрейфовым трубкам. Измерения представлялись в виде профилей – зависимостей амплитуд по всей длине дрейфовых трубок.

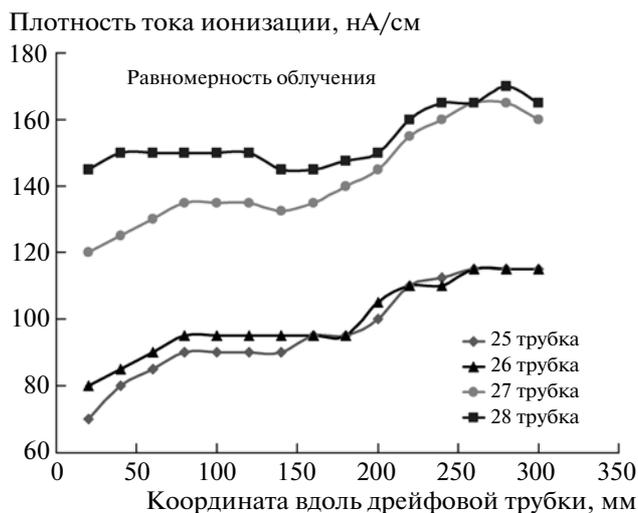


Рис. 6. Интенсивность облучения четырех дрейфовых трубок, находящихся друг за другом в разных слоях.

ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ

Исследования старения детектора в циркуляционной газовой системе проводились при двух циклах облучения, соответствующих разным периодам работы ускорителя ЛНС. Условия проведения опытов были следующими:

- газовая смесь $\text{Xe}(75.3\%)/\text{CO}_2(21.7\%)/\text{O}_2(3.0\%)$;
- объем газовой системы с детектором – 2.52 л;
- в системе чистки применен катализатор ГТТ объемом 20 см³;
- в системе установлен мощный источник примесей, который дает радиационное старение 1%/ч, что на два порядка больше контролируемого уровня загрязнений при сборке газовой системы;
- средний поток в циркуляционной системе 0.3 л/ч;
- средний поток через одну трубку 0.15 см³/мин;
- величина утечки газа из системы – 0.027 ± 0.005 см³/мин;
- влажность газовой смеси во время опыта внутри детектора 2000 ppm.

Первый цикл облучения проводился с рабочей для коллайдера ЛНС плотностью тока ионизации в детекторе 70–150 нА/см. Время облучения составило ~3500 ч. Первые 1000 ч радиационного старения в дрейфовых трубках не наблюдалось благодаря работе фильтра ГТТ. Однако в течение следующих 1000 ч облучения амплитуда сигналов в районе входа газа в детектор постепенно уменьшалась. В остальной части детектора вдоль по потоку газа происходило накопление озона, который препятствовал процессам полимеризации сравнительно малых концентраций примесей на аноде детектора.

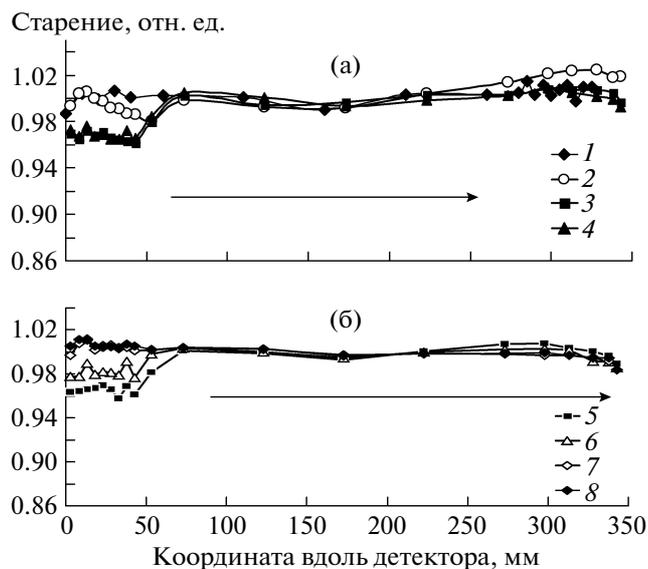


Рис. 7. Зависимость радиационного старения от координаты для трубки № 21 детектора переходного излучения: **а** – без замены фильтра за 0 ч (1), 1312 ч (2), 1854 ч (3), 2225 ч (4) облучения; **б** – с новым фильтром за 0 ч (5), 266 ч (6), 582 ч (7), 793 ч (8) облучения.

На рис. 7 показаны профили для облучаемой дрейфовой трубки № 21. Прогрессирующее уменьшение амплитуды сигналов со стороны входа газа в детектор после 1000 ч облучения свидетельствует о насыщении фильтра и выносе силиконовых примесей в детектор (рис. 7а).

После 2225 ч облучения загрязненный фильтр был заменен на новый, и через 800 ч амплитуды сигналов детектора полностью восстановились (рис. 7б).

Такая динамика радиационного старения указывает на наличие двух конкурирующих процессов – полимеризации и деполимеризации примесей на анодах, происходящих в ионизованном газе. Доминирование одного из этих процессов зависит от концентрации как примесей в газе, так и химически активных соединений, возникающих в газе при ионизации и приводящих к очистке анода [9].

Первые 1000 ч облучения благодаря работе фильтра концентрация примесей, попадающих в детектор, мала, поэтому старения нет. В этом случае процесс анодной чистки преобладает. Затем происходит насыщение фильтра примесями, и он перестает работать. Это приводит к значительному превышению концентрации примеси на входе в детектор и, как следствие, доминированию процесса полимеризации примесей на аноде (см. рис. 7а). Замена через 2000 ч фильтра на новый приводит к уменьшению концентрации примесей на входе в детектор и к преобладанию процесса деполимеризации отложений на аноде (см. рис. 7б).

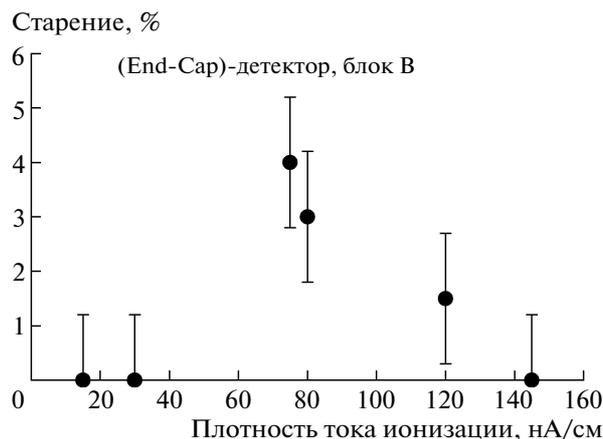


Рис. 8. Зависимость радиационного старения дрейфовых трубок от плотности тока ионизации.

Таким образом, замена фильтра каждые 1000 ч работы позволяет избежать старения детектора, даже при достаточно высокой концентрации загрязняющих примесей.

В ходе первого цикла измерений выявлена зависимость величины радиационного старения от плотности ионизации в разных слоях дрейфовых трубок – эффект старения уменьшается с увеличением плотности ионизации. Для уточнения этой зависимости проведен второй цикл измерений с уменьшенной плотностью ионизации.

Второй цикл облучения проводился в течение 2300 ч в тех же условиях, но при малых токах облучения детектора, 15–30 нА/см. В ходе этих измерений радиационного старения не наблюдалось.

Рис. 8 иллюстрирует зависимость величины радиационного старения от плотности ионизации при длительности облучения ~2300 ч, когда фильтр начинает пропускать примеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что использование фильтра ГТТ в течение 1000 ч позволяет полностью предотвратить радиационное старение в прототипе газовой системы, даже при наличии мощного источника силиконового загрязнения (1%/ч). Реальный уровень источников загрязнений внутри газовой системы детектора переходного излучения на два порядка меньше и обеспечивается контролем чистоты ее элементов на всех этапах сборки газовой системы. Таким образом, можно ожидать, что с учетом скважности пучка протонов коллайдера ЛНС фильтр ГТТ объемом 20 л обеспечит предотвращение радиационного старения детектора в течение 200000 ч. Показано существование двух эффектов в ионизованном газе – полимеризации и деполимеризации, приводящих соответственно либо к старению, либо к очистке депозитов на ано-

дах детектора. Эти процессы зависят от концентрации примесей и плотности ионизации газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bondarenko V.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1993. V. A327. P. 386.
2. *Akesson T., Arik E., Baker K. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. V. A522. P. 25.
3. *Akesson T., Anghinolfi F., Arik E. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. V. 51. № 3. P. 960.
4. *Abat E., Addy T., Akesson T. et al.* // ATLAS NOTE. ATL-PHY-PUB-2006-000. February, 21, 2007.
5. *Akesson T., Barberio E., Bondarenko V. et al.* // Nucl. Instrum. And Methods. 2003. V. A515. P. 166.
6. *Ruthven D.M.* Principles of Adsorption and Adsorption Processes. N.Y.: Wiley-Interscience Publication, 1982.
7. *Lafferty J.* Foundations of vacuum science and technology. N.Y.: Wiley, 1998.
8. *Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н.* Физическая химия озона. М.: Изд-тво МГУ, 1998.
9. *Бондаренко В.Г., Васильева Л.Ф., Долгошеин Б.А. и др.* // IV конференция Научно-образовательного центра CRDF. Сборник научных трудов. М.: МИФИ, 2008. С. 14.