

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования

«Московский физико-технический институт
(государственный университет)»

Факультет общей и прикладной физики

Кафедра физики высоких энергий

Выпускная квалификационная работа бакалавра

**Дрейфовые трубки диаметром 30 мм с лавсановым корпусом для
изготовления прецизионной трековой камеры**

Выполнил:
студент 324 группы
Кондратьев А.Г.

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., Фахрутдинов Р.М.

НИЦ «Курчатовский
институт» ИФВЭ

Протвино 2017

Оглавление

1 Введение	2
2 Конструкция дрейфовой трубки	5
3 Технология изготовления трубок	7
4 База данных	10
5 Контроль качества трубок	
5.1 Натяжение	11
5.2 Сопротивление листов	14
5.3 Общее сопротивление трубок	16
5.4 Испытания на герметичность	18
5.5 Высоковольтные испытания	20
6 Заключение	22
7 Список литературы	23

1 Введение

В экспериментах с элементарными частицами для проведения измерений используются детекторы, работающие на разных физических принципах. Работа ионизационных детекторов основана на явлении ионизации. Пролетающая через вещество заряженная частица ионизирует его. Разность потенциалов между анодом и катодом в ионизационной камере вызывает движение образовавшихся электронов и ионов. Возникающий ток считывается и обрабатывается для определения некоторых характеристик излучения.

В основе принципа работы пропорциональных детекторов лежит процесс лавинного усиления заряда. В цилиндрическом электрическом поле электрон разгоняется и при столкновении ионизирует новый атом, электрон которого также ускоряется и ионизирует следующий атом. Возникает лавина электронов, и ток усиливается на несколько порядков. Итоговая величина тока пропорциональна начальному току, который пропорционален ионизации. В режиме пропорционального усиления детекторы способны измерять величину ионизации, оставленной заряженной частицей [1].

В дрейфовых детекторах электроны, образовавшиеся в процессе первичной ионизации, перемещаются со скоростью дрейфа, которая зависит от состава и давления газа и напряженности поля. Соответственно, зафиксировав момент прохождения заряженной частицы через дрейфовую камеру (например, с помощью сцинтилляционных счетчиков) и время прихода сигнала с нее, при известной скорости дрейфа легко восстанавливается расстояние, на котором частица пролетает от сигнальной проволоки камеры. Определив расстояния до нескольких проволок, можно восстановить с хорошей точностью траекторию частицы. В современных дрейфовых камерах пространственное разрешение

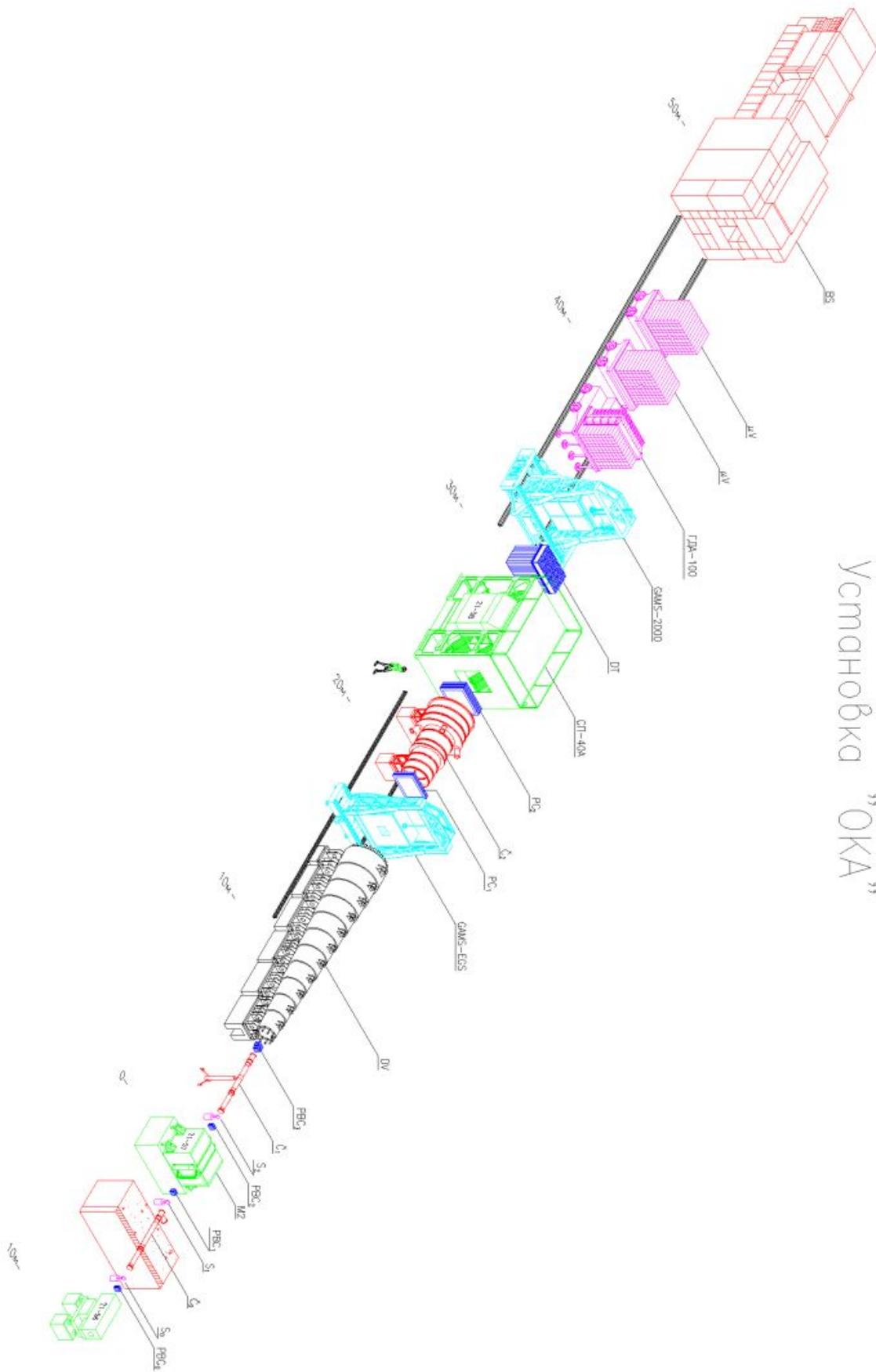
составляет величину порядка 100 мкм.

Существует множество различных конструкций дрейфовых детекторов, в том числе распространены многопроволочные камеры детекторов. Основное достоинство трубочных камер – устойчивость системы в целом при выходе из строя отдельных элементов (дрейфовых трубок). Поэтому использование детекторов из дрейфовых трубок зачастую является более предпочтительным, чем использование других типов дрейфовых детекторов.

Данная работа посвящена дрейфовым трубкам, корпус которых изготовлен из лавсановой пленки толщиной 0.125 мм с двухсторонним алюминизированным покрытием (толщина 0.08 мкм). Целью работы является изучение производственного процесса дрейфовых трубок, создание базы данных для контроля качества и изучения временных изменений характеристик трубок.

Дрейфовые камеры из лавсановых дрейфовых трубок уже применяются в экспериментах на ускорителе У-70 в НИЦ “Курчатовский институт” - ИФВЭ, в частности в экспериментальной физической установке “ОКА”, предназначенной для изучения К-мезонов [2]. Экспериментальная установка состоит из распадного объёма с охранной системой, магнитного спектрометра с пропорциональными камерами, дрейфовыми трубками и годоскопами, электромагнитного калориметра типа GAMS, черенковских счётчиков, адронного калориметра, мюонных детекторов. Дрейфовая камера обозначена на схеме установки (рис.1) буквами “DT” [3].

Дальнейшее совершенствование трековой системы установки “ОКА” предполагает изготовление новой дрейфовой камеры из лавсановых дрейфовых трубок.



Установка "ОКА"

Рис. 1. Схема установки ОКА.

2 Конструкция дрейфовой трубки

Корпусом и катодом дрейфовой трубки является полый цилиндр диаметром 30 мм из лавсана толщиной 0.125 мм, покрытого слоем алюминия с обеих сторон. Оба конца трубки герметично закрыты пластиковыми торцевыми заглушками с трубками-вставками из латуни и внешними кольцами из алюминия. Во вставки-трубки в торцевых заглушках устанавливаются позиционирующие пластины из латуни толщиной 0.5 мм, в которых лазерным излучением прожигаются сквозные отверстия диаметром 60 ± 7 мкм. Через эти отверстия проходит позолоченная вольфрам-рениевая сигнальная проволока, которая натягивается с усилием 350 г и в конце торцевого элемента кримпируется в медном капилляре с помощью пневмозажима.

Газовая смесь поступает в трубку через газовый подвод. Трубки образуют единую газовую систему, соединяясь друг с другом пластмассовыми газовыми переходниками.

Напряжение на анодную проволоку подается через сигнальный колпачок с одной стороны трубки, с другой ее стороны второй сигнальный колпачок подключается к усилителю формирования. Для получения электрического контакта между лавсановым корпусом и переходной платой электроники в наружное алюминиевое кольцо торцевой заглушки вставляется заземляющий штырь.

Такая конструкция дрейфовой трубки удовлетворяет требованиям ряда физических экспериментов.

На рис. 2 и 3 приведены конструкция дрейфовой трубки и фотография торцевых заглушек [4].

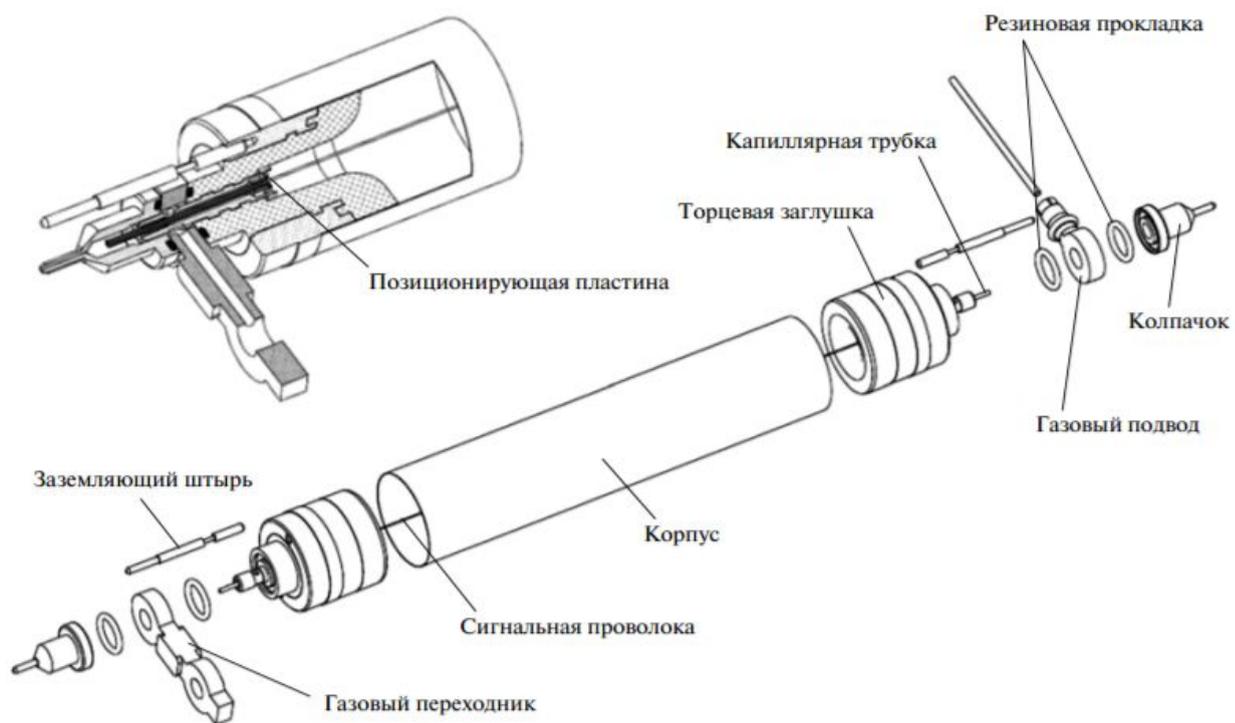


Рис 2. Конструкция дрейфовой трубки



Рис. 3. Торцевые заглушки дрейфовых трубок

3 Технология изготовления трубок

Для изготовления корпуса одной трубки требуется лист из лавсана, алюминизированного с обеих сторон, длиной 1300 мм и шириной 100 мм [5]. Для этого рулон лавсановой пленки разрезается на специальном стенде на полосы соответствующих размеров. Каждая полоса сначала визуально оценивается на наличие дефектов. Затем измеряется электрическое сопротивление с каждой стороны. Если его значение на стороне с меньшим сопротивлением превышает 50 Ом/метр, то полоса бракуется. Прошедшие проверки полосы-заготовки укладываются в стопку таким образом, чтобы стороны с большим сопротивлением, предназначенные для внешней поверхности трубки, оказались снизу.

Ультразвуковая сварка полос-заготовок осуществляется на специальном сварочном стенде (рис. 4). Полоса оборачивается вокруг шлифованного цилиндрического стержня и закрепляется прижимами на сварочном стапеле. Затем включается ультразвуковая колебательная система сварочного аппарата. Во избежание перегрева аппарата подается охлаждающий воздух. Скорость перемещения сварочной головки аппарата вдоль оси стержня около 1 см/сек. Края лавсановой полосы свариваются внахлест. После сварки корпус трубки освобождается от прижимов и снимается со стержня, а его внутренняя поверхность подвергается вакуумной очистке от пыли.

Корпус трубки и два торцевых элемента закрепляются внутри опор-держателей сборочного стапеля. Через трубку протягивается позолоченная вольфрам-рениевая (97% W + 3% Re) проволока диаметром 50 мкм в следующем порядке: в первую очередь проволока пропускается через медный капилляр и позиционирующий элемент первого торцевого элемента. Затем через лавсановый корпус трубки. После этого через

позиционирующий элемент и капилляр второго торцевого элемента. Проволока отрезается так, чтобы оставались свободные концы с обеих сторон трубки длиной 30-50 см.



Рис. 4. Фотография станда ультразвуковой сварки лавсановых корпусов дрейфовых трубок

Торцевые заглушки вклеиваются в лавсановый корпус трубки. Для получения надежного электрического контакта внутреннего алюминиевого слоя лавсановой трубы с торцевым элементом клеевое соединение обжимается резиновыми кольцами. Затем трубка устанавливается на стан, задающий определенную длину, где трубки выдерживаются не менее 12 часов до затвердевания клея.

После затвердевания клея трубка переносится опять в сборочный

стенд. Проволока с одной стороны трубки обжимается в медной капиллярной трубке торцевого элемента при помощи пневматического обжимного устройства. С другой стороны конец проволоки прикрепляется к устройству натяжения. При включении этого устройства к проволоке, в автоматическом режиме, прикладывается предварительное усилие 450 граммов, которое через 1 минуту снижается до значения 350 граммов. После этого проволока кримпируется пневмозажимом в медном капилляре 2-го торцевого элемента и обрезается так, чтобы оставшаяся часть выступала из капилляра на длину 3-5мм.

После прохождения контроля качества трубки с обоих концов на нее надевается газовый соединитель. Сигнальный колпачок накручивается на центральный пин, трубка снимается с монтажного стола и укладывается для хранения.



Рис. 5. Готовые дрейфовые трубки

4 База данных

С целью контроля качества трубок и изучения временных изменений характеристик дрейфовых трубок была создана база данных. В базу занесены результаты измерений R и R_0 (общее сопротивление трубки, измеренное спустя 2 года после изготовления и при изготовлении соответственно), R_{\min} и R_{\max} (сопротивления внутренней и внешней сторон лавсановой трубки), T и T_0 (период резонансных колебаний проволоки, измеренное спустя 2 года после изготовления и при изготовлении соответственно), F и F_0 (сила натяжения проволоки, рассчитанное по измерениям периода резонансных колебаний спустя 2 года после изготовления и при изготовлении соответственно). Вид базы приведен ниже.

Данные измерения величин R_0 , R_{\min} , R_{\max} , T_0 и F_0 были взяты из лабораторного журнала, который заполнялся при изготовлении изучаемых трубок.

№ изм.	№ тр.	№ листа	R , Ом	R_0 , Ом	R_{\min} , Ом	R_{\max} , Ом	T , с	F , г	T_0 , с	F_0 , г
1										
2										
3										
...										
173										

Планируется дальнейшее использование данных о характеристиках трубок при изготовлении дрейфовой камеры.

5 Контроль качества трубок

5.1 Натяжение

При неvertикальном расположении трубок важным для точности измерения координат является провисание проволоки, натянутой вдоль трубки. Максимальное провисание проволоки определяется формулой $h = \frac{ql^2}{8F}$, где l - длина проволоки, q - вес единицы длины проволоки, F - сила натяжения проволоки. В исследуемых трубках $l = 1.3$ м, $F = 350$ г, $q = 0.39$ мг/см. Провисание проволоки в них составляет порядка 25 мкм.

Натяжение определяется из периода колебаний проволоки. По проволоке пропускаются импульсы тока в постоянном внешнем магнитном поле, что вызывает колебания проволоки и приводит к возникновению переменного тока в ней, период которого измеряется прибором.

Сила натяжения определяется по формуле $F = \frac{4\rho \cdot S \cdot l^2}{T^2}$, где l – длина проволоки, S – площадь поперечного сечения, ρ – плотность материала проволоки, T – период колебаний, измеряемый непосредственно. Для используемой проволоки $\rho \cdot S = 3.925 \cdot 10^{-5}$ кг/м. Результаты измерений представлены на рис. 6 и рис. 7, где рис. 6 соответствует первоначальным измерениям (при производстве трубок), а рис. 7 - измерениям, проведённым спустя 2 года после их изготовления.

Среднее значение натяжения проволок при первоначальных измерениях равно 351 г, среднеквадратичное отклонение 16 г.

Среднее значение натяжения проволок при повторных измерениях равно 346 г, среднеквадратичное отклонение 15 г.

За 2 года среднее, минимальное, максимальное значения натяжения проволок в трубках уменьшились на 1-2%.



Рис. 6. Натяжение проволок в трубках, первоначальные измерения.

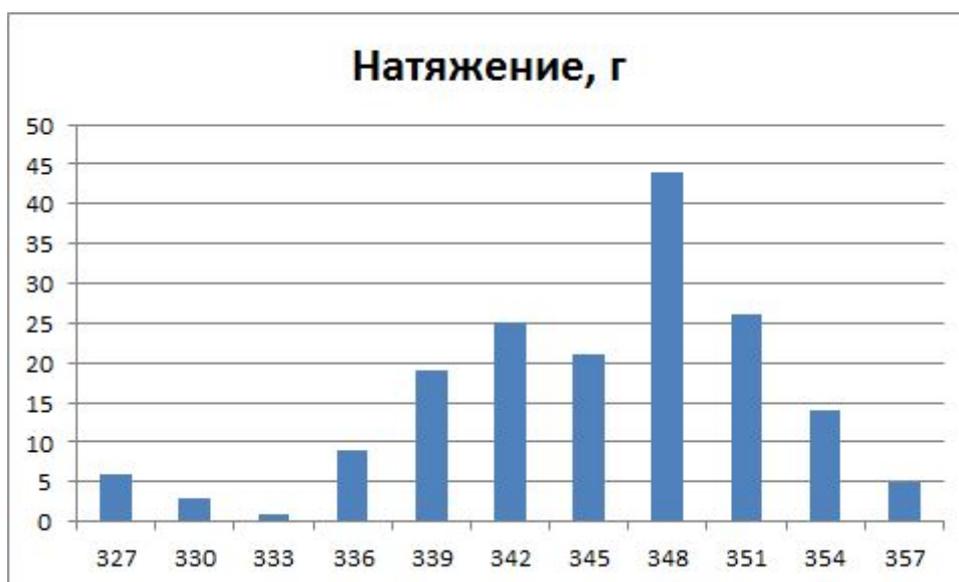


Рис. 7. Натяжение проволок в трубках, повторные измерения.

Натяжение и провисание проволоки зависят от температуры трубки. Для вольфрам-рениевой проволоки коэффициент линейного расширения α порядка $4.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а модуль упругости E порядка $35 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$. Для

лавсанового корпуса коэффициент линейного расширения α порядка $17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t$$

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

Значит, изменение температуры в пределах $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к изменению натяжения порядка 3%.

Таким образом, вне зависимости от температуры, через 2 года после изготовления трубки не бракуются из-за изменения натяжения проволоки.

5.2 Сопротивление листов

Сопротивление каждой из сторон алюминизированных лавсановых листов, из которых изготавливаются трубки, измеряется перед изготовлением трубки, при этом сторона с большим сопротивлением предназначена для внешней поверхности трубки.

Среднее значение сопротивления внешних поверхностей трубок 31 Ом, среднеквадратичное отклонение 7 Ом.

Среднее значение сопротивления внешних поверхностей трубок 44 Ом, среднеквадратичное отклонение 12 Ом.

Листы с сопротивлением внутренней поверхности более 50 Ом/м бракуются. Ни одна из исследуемых трубок по этому параметру не забракована.



Рис.8. Сопротивления внутренних поверхностей трубок.



Рис.9. Сопротивления внешних поверхностей.

5.3 Общее сопротивление трубок

Общее сопротивление измеряется между двумя торцевыми элементами дрейфовой трубки с помощью омметра. Результаты представлены на рис. 10.

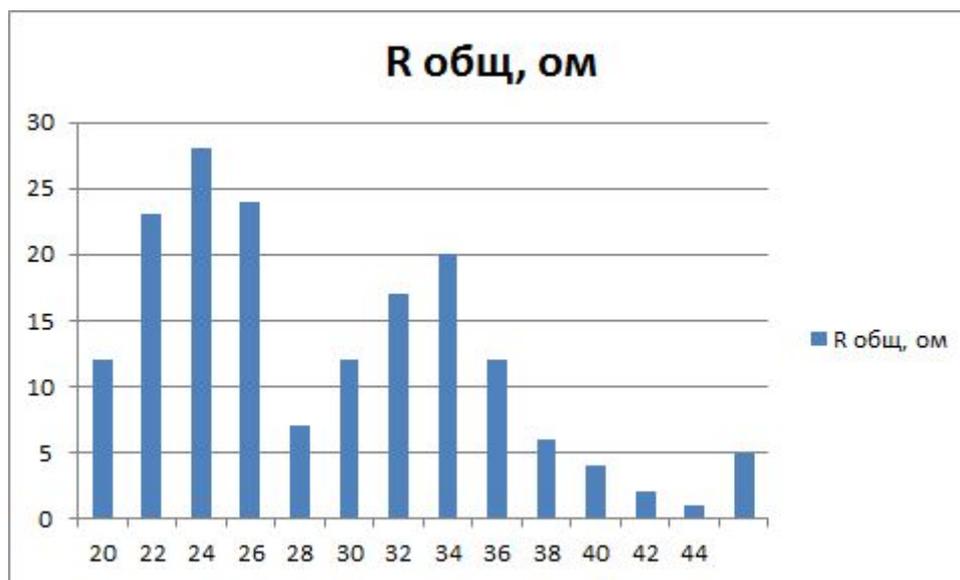


Рис. 10. Общее сопротивление.

Приведённая диаграмма отображает результаты измерений, проведенных спустя 2 года после изготовления трубок. Среднее значение 28 Ом, среднеквадратичное отклонение 6 Ом. Ни у одной трубки сопротивление не превысило 50 Ом/м, значит трубки не бракуются.

Измерения сопротивления тех же трубок проводились при их изготовлении, результаты были сравнены с последующими измерениями. На рис. 11 отображено распределение разности общего сопротивления при повторном измерении и при изготовлении трубок.

Лишь для небольшого числа трубок общее сопротивление при повторном измерении оказалось меньшим, чем при первоначальном; для большей части трубок сопротивление увеличилось. Среднее значение

изменения сопротивления 3 Ом, среднеквадратичное отклонение 3 Ом.

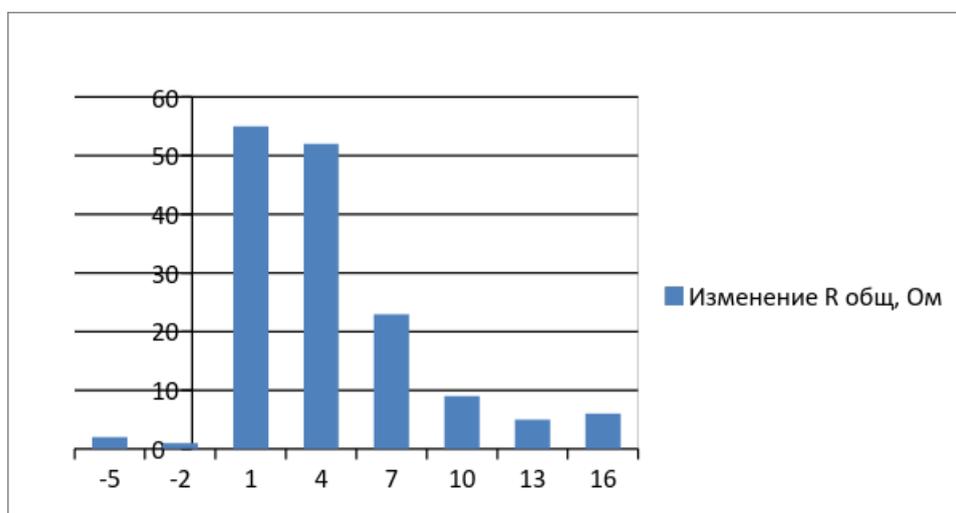


Рис. 11. Изменение сопротивления трубок при повторном измерении.

5.4 Испытания на герметичность

Контроль герметичности [5] дрейфовых трубок проводится на стенде пневмо-вакуумных испытаний путем измерения потока гелия из трубки, заполненной смесью азота и гелия, в вакуум. Схема стенда показана на рисунке 12 [4].



Рис. 12. Схема стенда проверки герметичности дрейфовой трубки

Испытуемая трубка загружается в вакуумную камеру. Камера и трубка одновременно откачиваются до давления ниже 10^{-5} бар, затем трубка заполняется смесью азота (90%) и гелия (10%) при давлении 2 бар. Гелий проникает в вакуумную камеру из дрейфовой трубки вследствие диффузии через лавсановую пленку и через возможные дефекты сварки и склейки. Результаты регистрации течеискателем потока гелия записываются в базу данных через 2 мин после напуска азотно-гелиевой смеси в дрейфовую трубку. Величина измеренного потока за это время составляет $\sim 50\%$ от стационарного, который устанавливается через несколько часов. Для трубки длиной 1.3 м гелиевая течь не должна превышать 10^{-4} л · мбар/с. Это соответствует течи 10^{-5} л · мбар/с по рабочему газу (Ar + 7% CO₂).

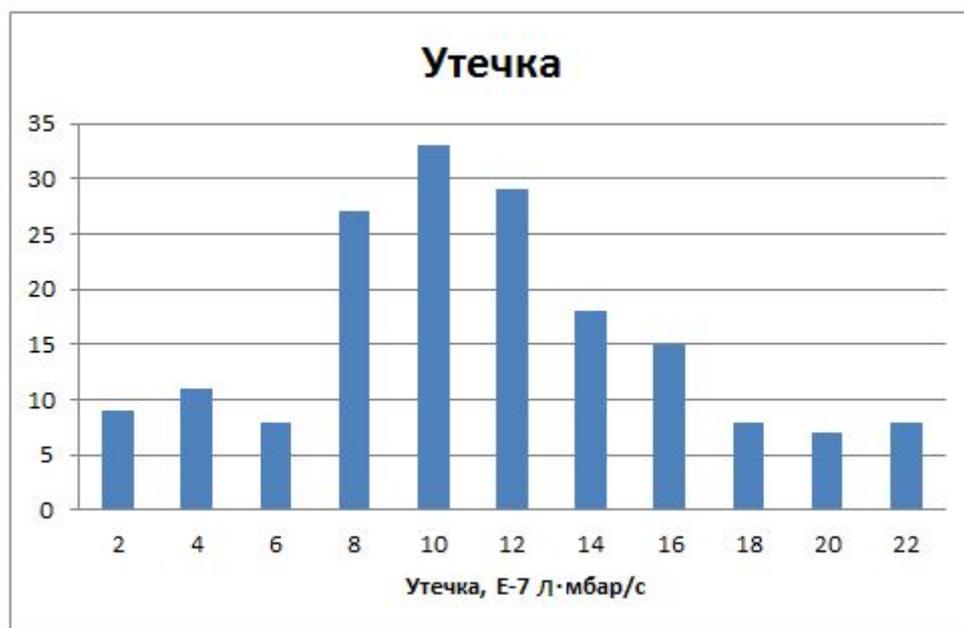


Рис. 13. Утечка.

Среднее значение $1.1 \cdot 10^{-6}$ л · мбар/с, среднеквадратичное отклонение $0.3 \cdot 10^{-6}$ л · мбар/с. Значение утечки в исследуемых трубках не превышает максимально допустимого значения, значит трубки не бракуются по этому параметру.

5.5 Высоковольтные испытания

Целью проведения высоковольтных испытаний [5] является построение вольт-амперной характеристики (рис.14) [4] для выявления возможных дефектов проволоки, электроизоляции торцевых элементов, внутреннего покрытия.

Высоковольтные испытания трубки проводятся на специализированном стенде путем измерения вольт-амперной характеристики при заполнении трубки атмосферным воздухом. Вольт-амперная характеристика снимается сначала при увеличении напряжения, затем при снижении напряжения. Верхнее значение напряжения определяется предельным током трубки – не более 2 мкА.

Трубки перед высоковольтными испытаниями должны выдерживаться после испытаний на герметичность не менее суток с открытыми колпачками в сборочном помещении, чтобы улетучился гелий.

Перед началом серии измерений в файл компьютера заносятся данные об атмосферном давлении, температуре и влажности воздуха.

Трубки устанавливаются в защитную камеру, к сигнальным проволокам подключаются усилители тока, защитная камера закрывается. Запускается программа автоматического контроля зависимости ток-напряжение. После завершения выполнения программы на экран монитора выводятся результаты. Если трубка не удовлетворяет критериям отбора, заложенным в программе, то трубка проходит процедуру «реанимации» - напряжение подключается в обратной полярности. После этого снова выполняется программа контроля. В случае нескольких неудачных попыток трубка бракуется.

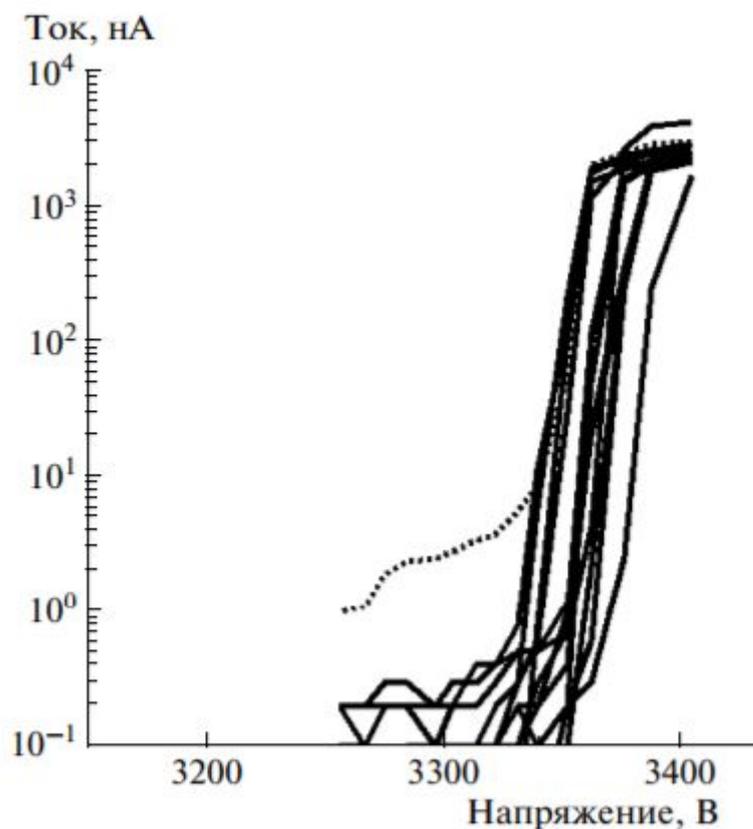


Рис. 14. Вольт-амперная характеристика трубок.

На рис.14 [4] сплошными линиями приведены вольт-амперные характеристики для нормальных трубок, характерной особенностью которых является быстрый рост тока при достижении определённого порогового напряжения. Пунктирной линией показана вольт-амперная характеристика не соответствующей критериям трубки.

6. Заключение

В данной работе описываются конструкция, технология производства и контроль качества дрейфовых трубок диаметром 30 мм, предназначенных для изготовления прецизионной трековой камеры, изученные автором работы в течение учебного года 2016/17. Также приведены данные выполненных повторных измерений характеристик дрейфовых трубок, изготовленных 2 годами ранее, анализ этих данных и сравнение их с данными, полученными при измерении характеристик во время изготовления этих дрейфовых трубок.

Повторные измерения показали, что исследуемые дрейфовые трубки пригодны для использования спустя 2 года после изготовления.

Автор данной работы принял непосредственное участие в изготовлении, проведении контрольных испытаний и измерениях характеристик дрейфовых трубок для новой камеры.

7. Список литературы

- [1] Sauli F, «Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers» Yellow Report CERN 77-09 (1977).
- [2] V.F.Obraztsov. ОКА: the experimental program with RF-separated K⁺-beam. Kaon 2005 Int. Workshop. Northwestern University, Evanston, USA, 13-17 June 2005.
- [3] Установка ОКА ИФВЭ, exwww.ihep.su/ihep/expu70/oka.htm
- [4] Н.И.Божко и др. Прецизионная дрейфовая трубка в корпусе из лавсана. Препринт ИФВЭ 2012-3; ПТЭ, №2, 2013, с. 16-21.
- [5] Разовый технологический регламент «Производство лавсановых дрейфовых трубок диаметром 15 мм». НИЦ “Курчатовский институт” ФГБУ ГНЦ ИФВЭ, 2015.