

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Физтех-школа Фундаментальной и Прикладной Физики
Кафедра физики высоких энергий

Направление подготовки / специальность: 03.03.01 Прикладные математика и физика
(бакалавриат)

Направленность (профиль) подготовки: Физика микромира

**МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИСПЫТАНИЙ
ДРЕЙФОВЫХ ТРУБОК В ЛАВСАНОВОМ КОРПУСЕ
ДИАМЕТРОМ 15 ММ ДЛИНОЙ ДО 2.5 М**

(бакалаврская работа)

Студент:

Ишмаев Олег Игоревич

(подпись студента)

Научный руководитель:

Фахрутдинов Ринат Макаримович,
канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.

(подпись научного руководителя)

Консультант (при наличии):

(подпись консультанта)

Москва 2019

Аннотация

В данной выпускной квалификационной работе ставится задача описать конструктивные особенности, технологию производства и провести систематизацию и анализ характеристик дрейфовых трубок длиной до 2,5 метров для установки «ВЕС» в ИФВЭ. В итоге были представлены критерии допуска трубок для вклейки в камеру. По этим данным и критериям можно сделать вывод о пригодности трубок для склейки в камеру и их характеристиках.

Оглавление

1 Введение	4
2 Структура дрейфовой трубки	8
3 Методы изготовления дрейфовой трубки	10
4 Контроль качества трубок	14
4.1 Сопротивление лавсановых лент	14
4.2 Сопротивление трубок	15
4.3 Натяжение и провисание проволоки	17
4.4 Высоковольтные испытания	21
4.5 Испытания на герметичность	24
5 Заключение	26
6 Список литературы	27

Введение

В физике высоких энергий для измерения координат треков заряженных частиц часто используются дрейфовые камеры, состоящие из нескольких слоев дрейфовых трубок. В отличие от плоских и сферических многопроволочных камер, цилиндрические более устойчивы, так как выход из строя нескольких трубок позволяет всей камере продолжать работу, поэтому данная конструкция более предпочтительна. Эти трубки работают по принципу ионизационных детекторов. Заряженная частица, двигаясь внутри трубки, ионизирует газ вдоль своей траектории, электроны ионизации дрейфуют под действием электрического поля по направлению к сигнальной проволоке. Вокруг проволоки находится область сильного электрического поля. Величина этого поля обратно пропорциональна расстоянию до проволоки. В этой области электроны сталкиваются с молекулами газа и набирают достаточно энергии для их ионизации. Если энергия электрона на длине пробега достаточна, то после первого столкновения с молекулой газа в объеме трубки появляются дополнительно один электрон и ион, образовавшиеся при столкновениях новые электроны также ускоряются под действием поле, ионизируют новые атомы, и т.д. Возникает электронная лавина – экспоненциальной рост носителей заряда между катодом и анодом за счет ударной ионизации молекул электронами. Движущиеся заряды лавины приводят к появлению электрического сигнала на проволоке. Коэффициент ударной ионизации зависит от длины свободного пробега и резко зависит от напряженности поля. В результате возникает импульс тока. Если напряжение не слишком большое, то конечный ток пропорционален начальному. Этот ток считывается и обрабатывается для получения различных характеристик.

В дрейфовых трубках электроны первичной ионизации распространяются в газе с определенной скоростью. Эта скорость называется дрейфовой и зависит от величины электрического поля, а также от химического состава и давления газа. Зная время появления сигнала на проволоке относительно момента прохождения частицы через трубку, можно определить расстояние между траекторией частицы и проволокой. Имея значения этих расстояния с различных трубок, можно воссоздать траекторию частицы. Пространственное разрешение в исследуемых камерах составляет 100мкм.

Исторические корни производства майларовых трубок в ИФВЭ связаны с 30-миллиметровыми тонкостенными алюминиевыми дрейфовыми трубками для мюонного спектрометра ATLAS, около 76000 трубок, собранных в 254 камеры. Эти камеры надежны и экономичны для трекеров большой площади. После создания ATLAS было собрано около 5000 трубок (28 камер), как того требовали эксперименты на ускорителе ИФВЭ с энергией 70 ГэВ. В ответ на желание этих экспериментов получить, несмотря на более дорогое производство, были разработаны 30-миллиметровые трубки с майларовой стенкой размером 125 микрометров. За счет майларового корпуса трубки снижается количество вещества на пути регистрируемых частиц и повышается разрешающая способность камер.

Затем было решено производить дрейфовые трубки диаметром 15 мм из майларовой пленки 125 микрометров (рис. 1.1). В процессе разработки был использован опыт работы с алюминиевыми и майларовыми трубками диаметром 30 мм. Для определения натяжения проволоки, фиксации и расположение проволоки были проведены небольшие изменения на стендах сборки. Также для процедуры контроля качества были выведены новые критерии отбора трубок.



Рис. 1.1: 30 и 15-миллиметровая дрейфовые трубки и торцевые заглушки (эндплагги)

Использование 15-миллиметровых трубок вместо 30-миллиметровых позволяет существенно увеличить загрузочную способность камер. Уменьшение диаметра трубок вдвое приводит к сокращению среднего времени дрейфа электронов в 2 раза, а загрузочная способность вырастает в 4 раза из-за эффекта объемного заряда, следовательно загрузочная способность дрейфовых камер вырастает примерно на один порядок

В данной работе мы будем рассматривать 15 мм трубки длиной 2.5 м и 2,07 м. Из данных трубок будет собрана дрейфовая камера для установки «ВЕС», на которой проводятся эксперименты по адронной спектроскопии. Существующая система дрейфовых камер (6, рис.4) перекрывает площадь

около $2 \times 2.5 \text{ м}^2$ перед электромагнитным калориметром. В центре камер имеется область $45 \times 45 \text{ мм}^2$, которая не чувствительна к заряженным частицам. Планируется добавить систему дрейфовых камер (рис.2), состоящих из 15-мм дрейфовых трубок, которая позволит расширить возможности трековой системы в центральной области перед электромагнитным калориметром. Трубки с диаметром 15 мм обладают повышенной загрузочной способностью по сравнению с 30-мм дрейфовыми трубками, следовательно новые камеры будут без "мертвых" зон. Чтобы пролетающие частицы внутри установки не взаимодействовали с торцевыми заглушками, электроникой и креплениями дрейфовой камеры, было решено сконструировать длинные трубки, чтобы большое количество вещества было за пределами апертуры

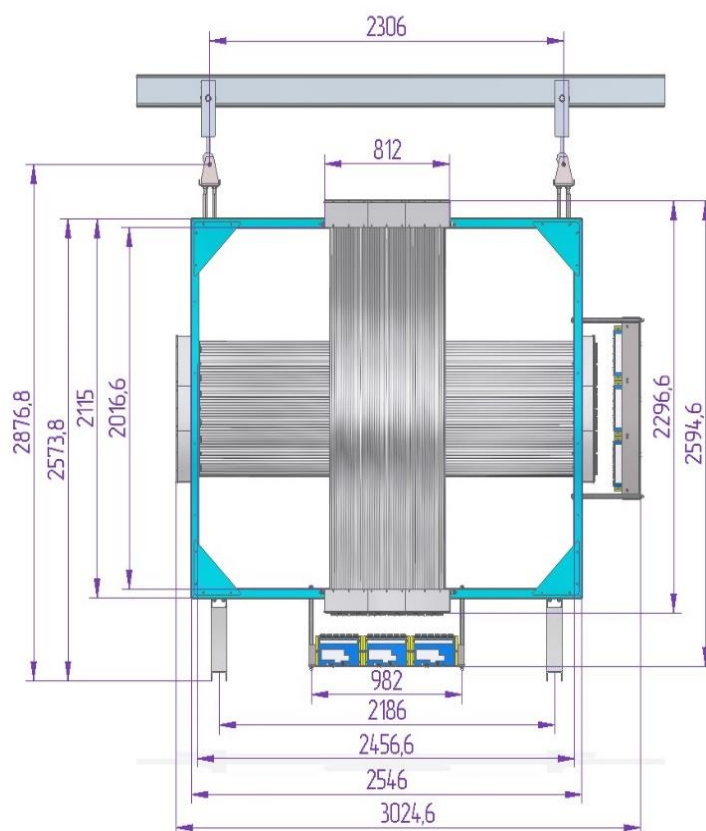


Рис. 1.2: Схема дрейфовой камеры для установки ВЕС

калориметра (рис. 4). Конструкция камеры представляет собой 3 слоя трубок с расстоянием 15.5 мм между сигнальными проволоками и общей толщиной

40.3 мм (рис. 3). Длина трубок - 2.07 м по горизонтальной оси и 2.5 м по вертикальной.

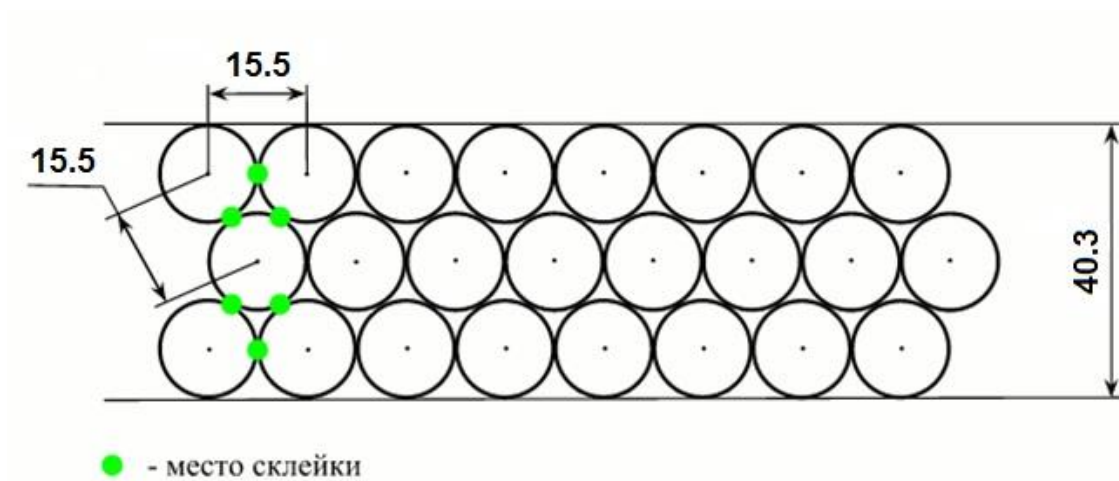


Рис 1.3: Схематичное расположение трубок в склеенной дрейфовой камере

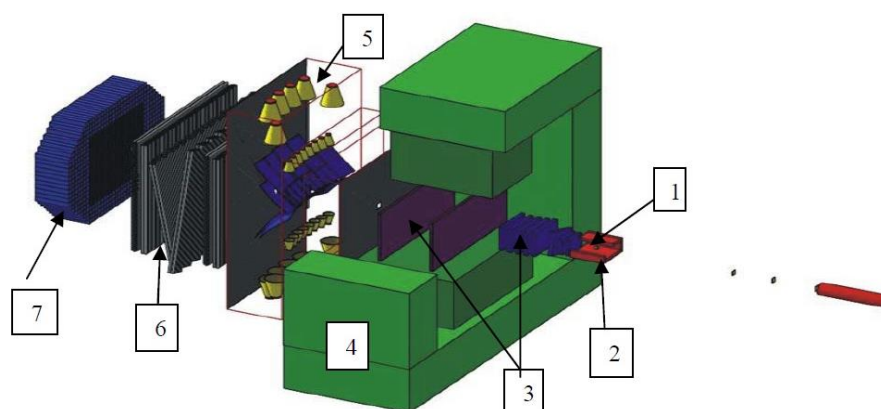


Рис 1.4: Схематичное изображение установки ВЕС: 1-мишень, 2-охранная система, 3-система пропорциональных камер, 4-широкоапертурный магнит, 5-многоканальный черенковский счетчик, 6-система плоскостей дрейфовых трубок, 7-ЭМК 2

Конструкция 15мм трубок

Для производства труб используется майларовая лента толщиной 125 мкм и шириной 700 мм. Лента покрыта алюминием с обеих сторон по технологии вакуумного напыления. В дальнейшем поверхность этой ленты с меньшим сопротивлением будет катодом трубки. Удельное сопротивление алюминиевого слоя находится в диапазоне от 1 до 4 Ом / кв.

Дрейфовая трубка состоит из майларовой трубки диаметром 15мм, двух пластиковых торцевых заглушек (эндплагов), натянутой между ними сигнальной проволоки, закрепленной посредством кримпирования в медных капиллярных трубках с внутренним диаметром 0,35мм. Соединение трубки и эндплагов осуществляется за счет эпоксидного клея. При зажиме обеспечивается герметизация внутреннего объема трубки и электрический контакт внутренней поверхности тубуса с алюминиевым корпусом эндплага. Для дальнейшей работы по восстановлению траекторий заряженных частиц трубка заполняется газовой смесью. В состав газовой смеси входит аргон и углекислый газ (CO₂) в соотношении 94/6. Данный выбор обусловлен следующими условиями: время жизни электрона должно быть больше максимального времени дрейфа, газ ионизируется заряженными частицами, стабильное газовое усиление, сравнительно небольшая стоимость.

Технология производства эндплагов - литье под давлением из пластика «Noryl GFN3». В эндплаг встраиваются наружное кольцо из алюминия и внутренняя трубка-вставка из латуни. Чтобы анодная проволока диаметром 50 мкм точно позиционировалась, в трубках – вставках есть полу миллиметровые латунные пластины. В этих пластинах с помощью лазера прорезается отверстие диаметром 60 ± 7 мкм. Отклонение от оси опорной поверхности должно составлять не более 10 мкм. Это отверстие и отвечает за точное позиционирование проволоки.

Проволока изготовлена из сплава W / Re в соотношении 97/3 с позолоченной поверхностью, она натягивается внутри трубки с усилием 350 г. Далее на эндплаг надевается резиновая прокладка, пластмассовое газоподводное кольцо и далее фиксируются запорным колпачком. Вся эта конструкция обеспечивает герметизацию трубки. С помощью колпачка на сигнальную проволоку подается высокое напряжение с одного конца и обеспечивается подключение к усилителю-формирователю сигнала с другого. Через газоподводное кольцо и отверстия в центральной трубке-вставке газовая смесь подается внутрь дрейфовой трубки. Заземляющий штырь, вкручиваемый в готовую камеру между металлическими частями эндплагов и обеспечивает контакт между корпусом трубки (катодом) и переходной платой электроники.

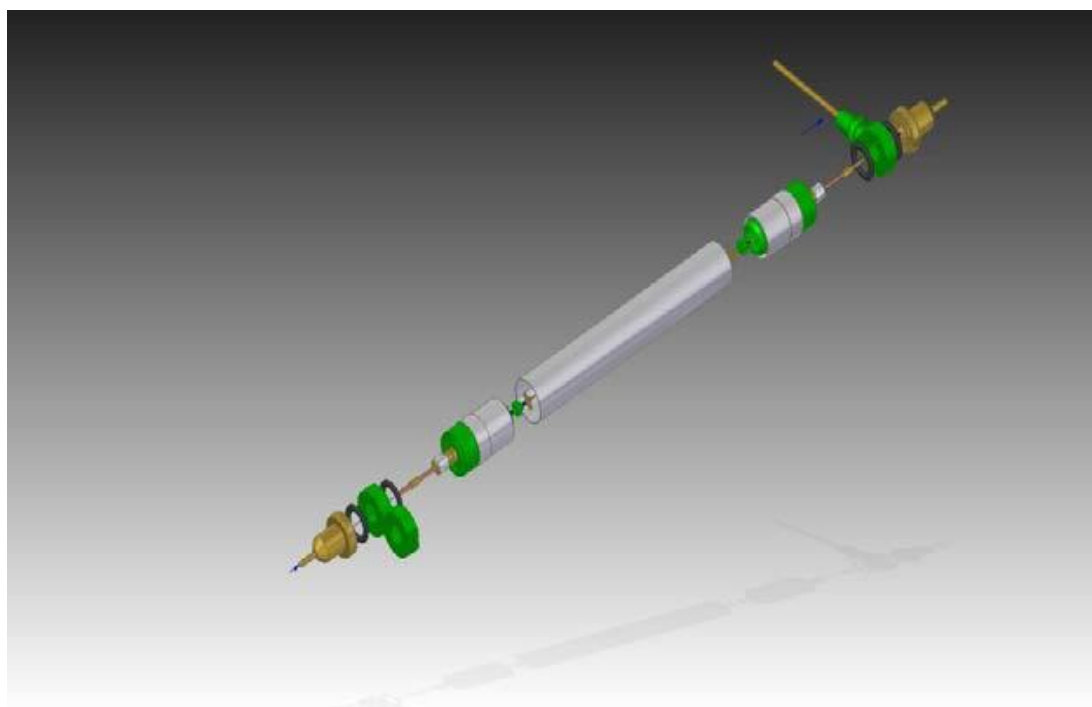


Рис. 5 Конструкция дрейфовой 15 – миллиметровой дрейфовой трубки



Рис. 2.2: Сигнальный колпачок (слева) и эндплаг (справа)

Технология изготовления трубок

Производство майларовых труб начинается с резки полос, ширина которых равна $55 \pm 0,25$ мм, длина соответствует собранной трубе.

Поверхностное сопротивление полосы измеряется с обеих сторон, сторона с меньшим сопротивлением будет внутренней поверхностью трубки. Если сопротивление превышает 100 Ом, то трубка бракуется. Полоса обернута вокруг полированной оправки диаметром 15 мм. Область перекрытия слоев составляет 4 мм (рис. 3.1). Стержень, обернутый майларовой лентой, помещается на сварочный степель, где края ленты фиксируются прижимами. Сначала прижимается одна сторона ленты дальним от оператора рядом прижимов, затем другая сторона ближним рядом. Далее процедура с дальним рядом прижимов повторяется, чтобы один край полосы плотно лег на другой. Затем полоска зажимается. Головка ультразвукового сварочного аппарата движется со скоростью около 1 см / сек вдоль оправки. После сварки оправка удаляется из трубы. Разрушающее усилие сварного шва находится в диапазоне от 8 до 10 кг / см (рис. 3.1).

Сваренная лавсановая трубка (рис. 3.2) снимается со стержня и проходит вакуумную очистку от пыли. На стенде для сборки анодная проволока из вольфрам-рениевого сплава с покрытием из золота протягивается через трубку и эндплаги. Затем на одном из эндплагов проволока фиксируется крепированием. Эндплаги смазываются эпоксидным клеем "ARALDITE AW-106" и вставляются в лавсановую трубку. Клеевое соединение сжимается с помощью резиновых колец для получения электрического контакта внутренней алюминиевой поверхности майларовой трубы с эндплагом. Затем на время затвердевания клея трубка помещается на специальный стенд. На нем поддерживаются определенное расстояние по длине и ориентация эндплагов. Далее с помощью специального прибора проволока натягивается с усилием 350 г и фиксируется во втором эндплаге. По резонансной частоте меряется реальное значение напряжения. После натяжения проволока крепировается

внутри медного капилляра во втором эндплаге, оставшиеся кусочки обрезаются так, чтобы выступающая из эндпалга часть была длиной 3-5 мм.

Газовые соединители устанавливаются на дрейфовую трубку после того, как она прошла все этапы контроля качества. На сигнальный колпачок надевается уплотнительное кольцо - резиновая прокладка диаметром 10 мм и толщиной 1,78 мм, а сигнальный колпачок накручивается на центральный пин. Таким образом газосоединительное кольцо зажимается между колпачком с прокладкой и пластиковым элементом эндплага.

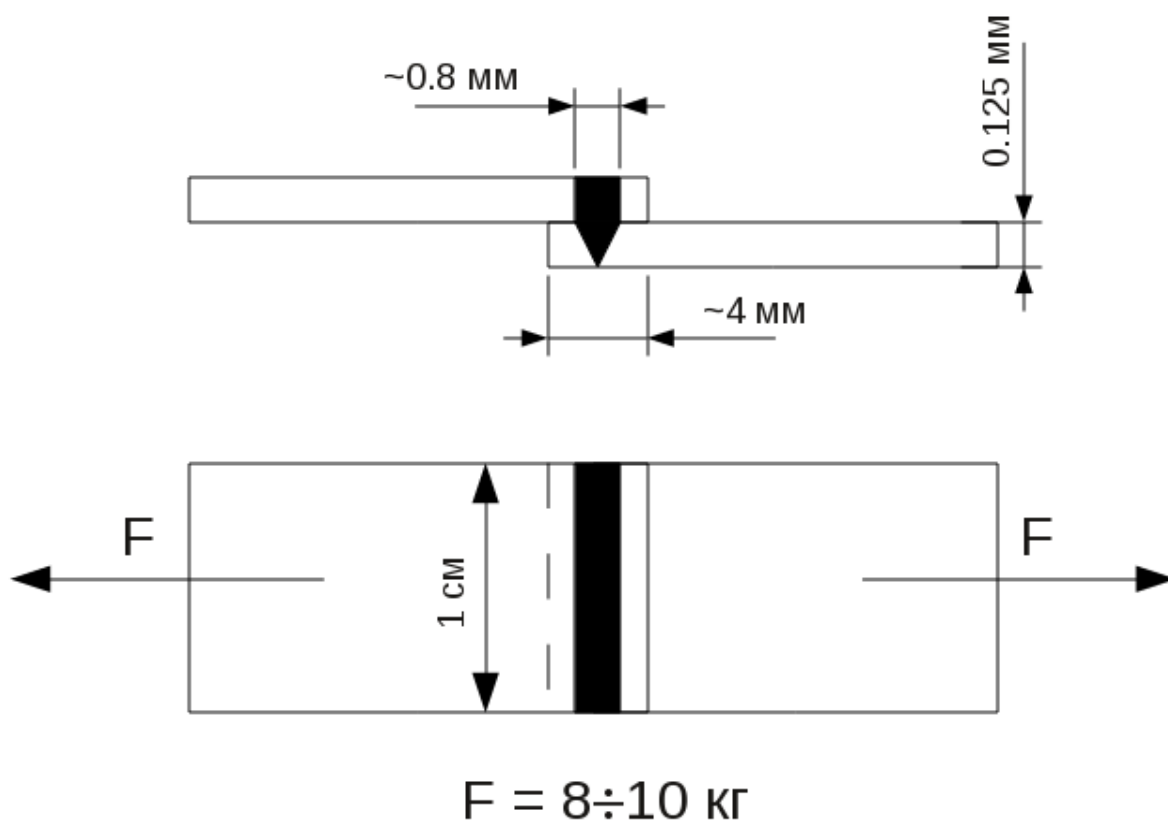


Рис. 3.1: Схематическое изображение сварного шва и испытание его на прочность



Рис. 3.2: 30-миллиметровая алюминиевая и лавсановая трубки, 15-миллиметровая лавсановая трубка

Контроль качества трубок

Сопротивление листов и трубок.

Майларовые листы разрезаются на ленты шириной 55 ± 0.25 мм. Чтобы исключить ленты с некачественным алюминиевым напылением (брак производства, царапины), измеряется сопротивление майларовых полос с двух сторон. Та сторона, у которой сопротивление больше, будет внешней стороной конструкции трубки.

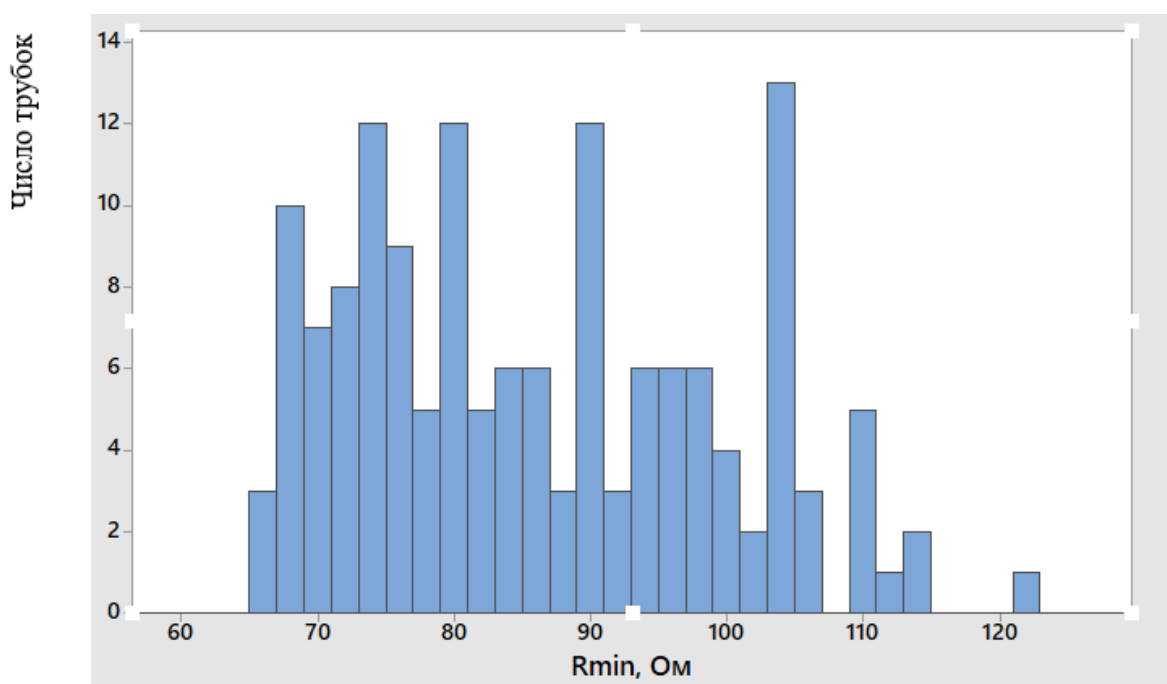


Рис. 4.1: Гистограмма сопротивления стороны полосы с меньшим сопротивлением (R_{min})

После процесса сборки трубок производится измерение сопротивления между элементами эндплаггов. Оно содержит в себе сопротивление поверхности внутри трубки и сопротивление соединений эндплаггов с внутренней частью трубки. Данный контроль нужен для отсеивания трубок с дефектным соединением и браком в алюминиевом напылении.

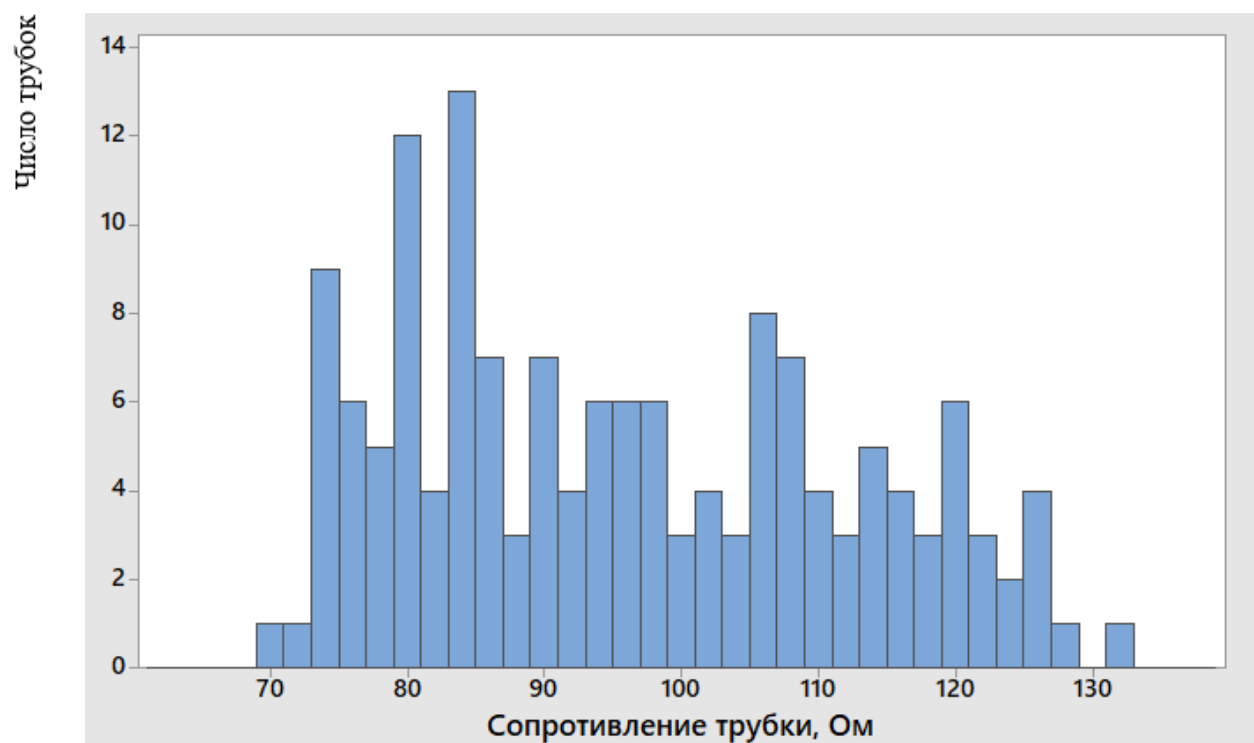


Рис. 4.2: Гистограмма сопротивления трубки после сборки ($R_{\text{трубки}}$)

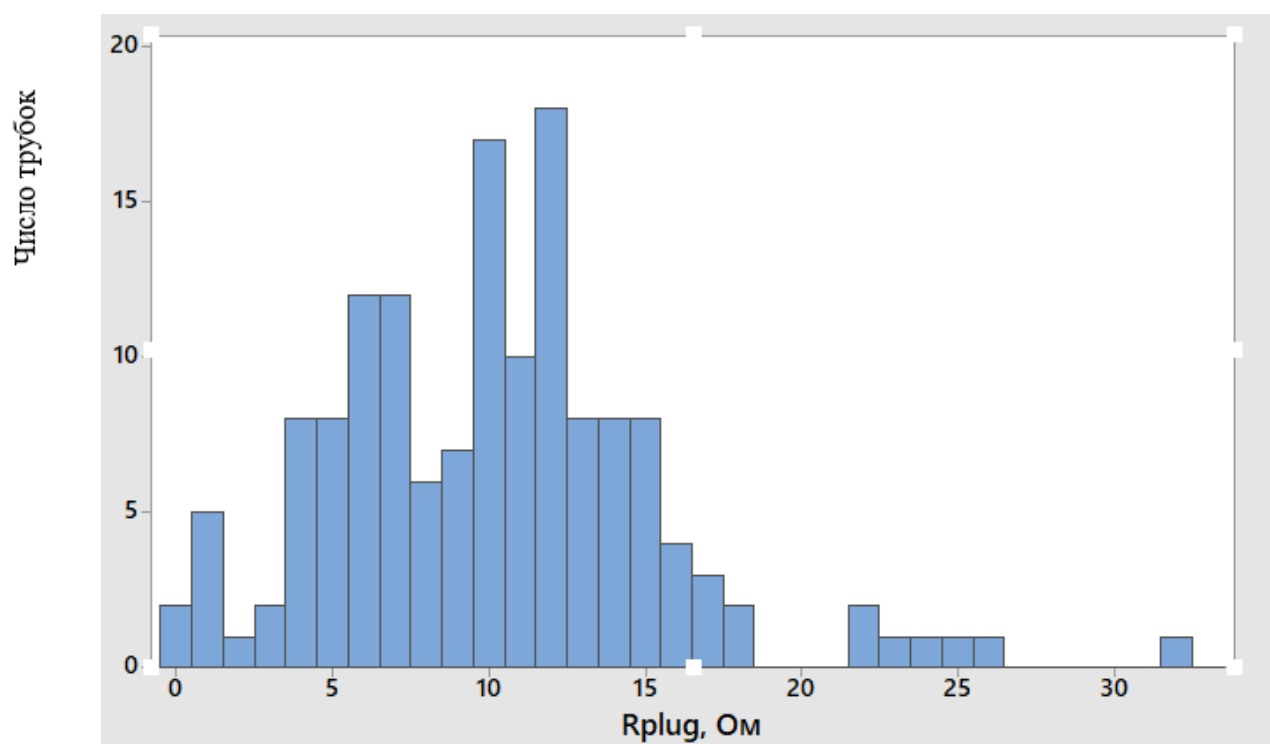


Рис. 4.3: Гистограмма сопротивления контакта дрейфовой трубки (R_{plug})

Критерий отбора трубок: $R_{\text{трубка}} < R_{\text{plug}} + 20$ Ом.

Оценка толщины напыления алюминия

Зная сопротивление и ширину майларовых полосок, можно оценить толщину слоя алюминия по формуле:

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

Где ρ – удельное сопротивление алюминия, l – длина майларовой полоски со слоем алюминия, S – площадь напыления алюминия.

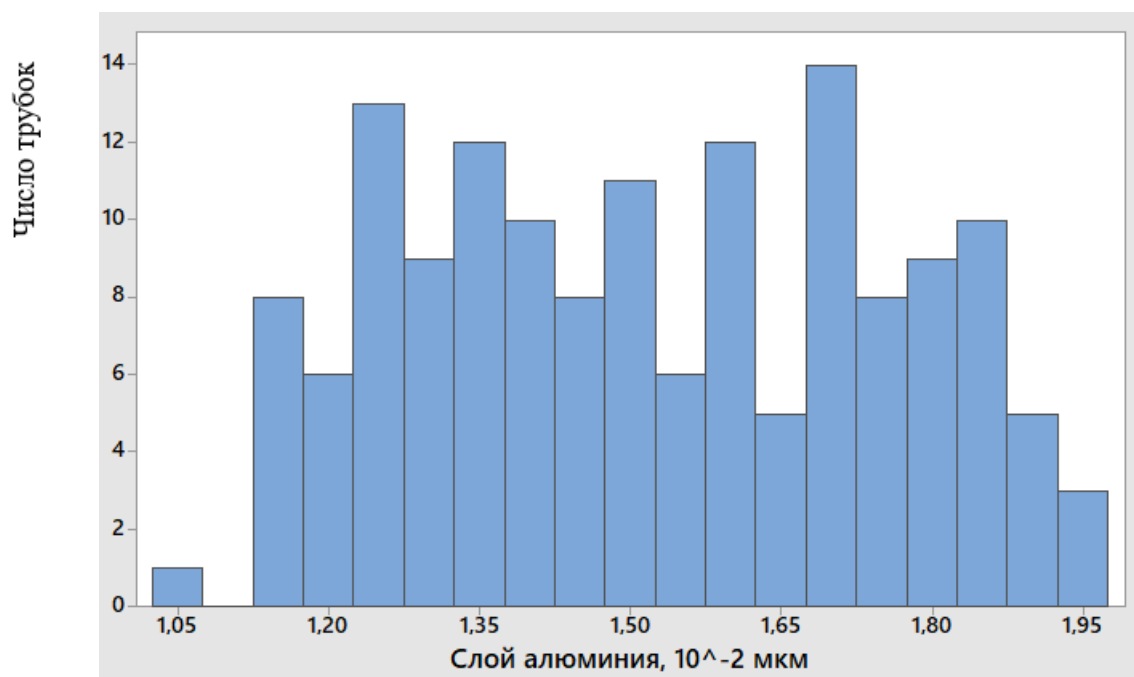


Рис. 4.4: Гистограмма толщины слоя алюминия на майларовых полосках

Натяжение проволоки внутри трубки

Вклад в разрешающую способность дрейфовых камер вносит точность положения трубок и сигнальных проволок внутри этих трубок. Механизмы для поддержания проволоки в центральной части трубки в данной конструкции трубки отсутствуют, проволока закреплена только с краев путем кремпирования в медном капилляре. В данном разделе учтем провисание проволоки только под действием сил тяжести. Данное провисание характерно для горизонтально расположенных трубок в камере.

Для измерения натяжения проволоки помещаем ее в магнитное поле и подаем на нее импульс тока. Импульс тока порождает колебания проволоки. Колебания в магнитном поле приводят к появлению переменного тока. Частота тока равна частоте колебаний проволоки. Период колебаний тока и измеряется прибором. Известна связь между резонансными колебаниями проволоки и ее натяжением:

$$\nu = \sqrt{\frac{gF}{4\rho S l^2}} = \frac{1}{T}$$

Откуда выражается сила натяжения F находится по формуле:

$$F = \frac{4l^2 \rho S}{gT^2},$$

где l - длина сигнальной проволоки, $\rho \times S = q$ - вес проволоки на единицу длины, который является произведением плотности материала и поперечного сечения проволоки; T – период колебаний. Значение для данной проволоки $\rho \times S = 3,92 \times 10^{-5}$ кг/м. Это значение определяется производителем и взято с катушки

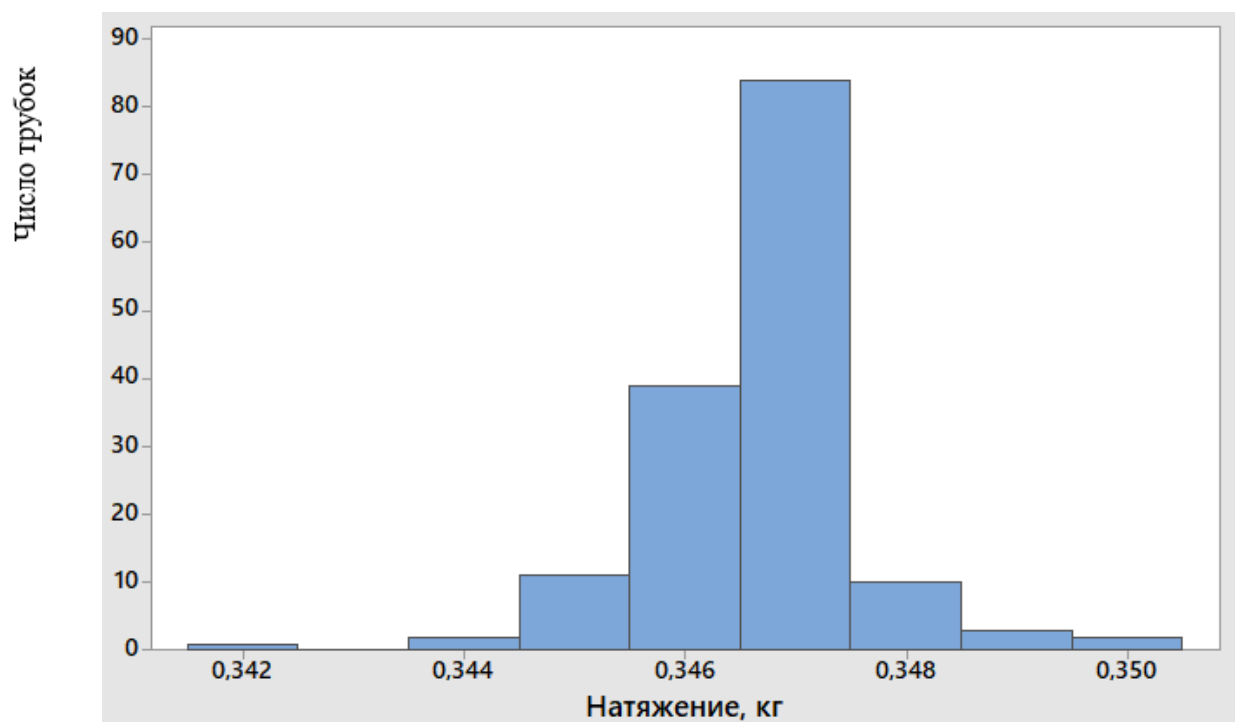


Рис. 4.5: Гистограмма натяжений проволоки

Среднее значение – 346,7 г; Среднеквадратичное отклонение – 0,1 г.

Провисание проволоки внутри трубки

Вклад в точность определение координаты трека в камере вносит провисание проволоки, которое зависит от натяжения и длины. Максимальное провисание проволоки определяется по формуле:

$$\Delta h = \frac{ql^2}{8F},$$

где q – вес проволоки на единицу длины, l – её длина, F – сила натяжения проволоки.

В нашем случае $l = 2,52$ м, $q = 0,392$ мг/см, $F = 350$ г. Как мы видим из распределения, максимальное провисание составляет 82,5 мкм. Это значение меньше 100 мкм, поэтому, зная координату трека вдоль длины проволоки, можно провисание учесть на стадии обработки и не влияет на точность реконструкции трека. Погрешность провисания определяется только погрешностью определения натяжения и составляет 4 мкм.

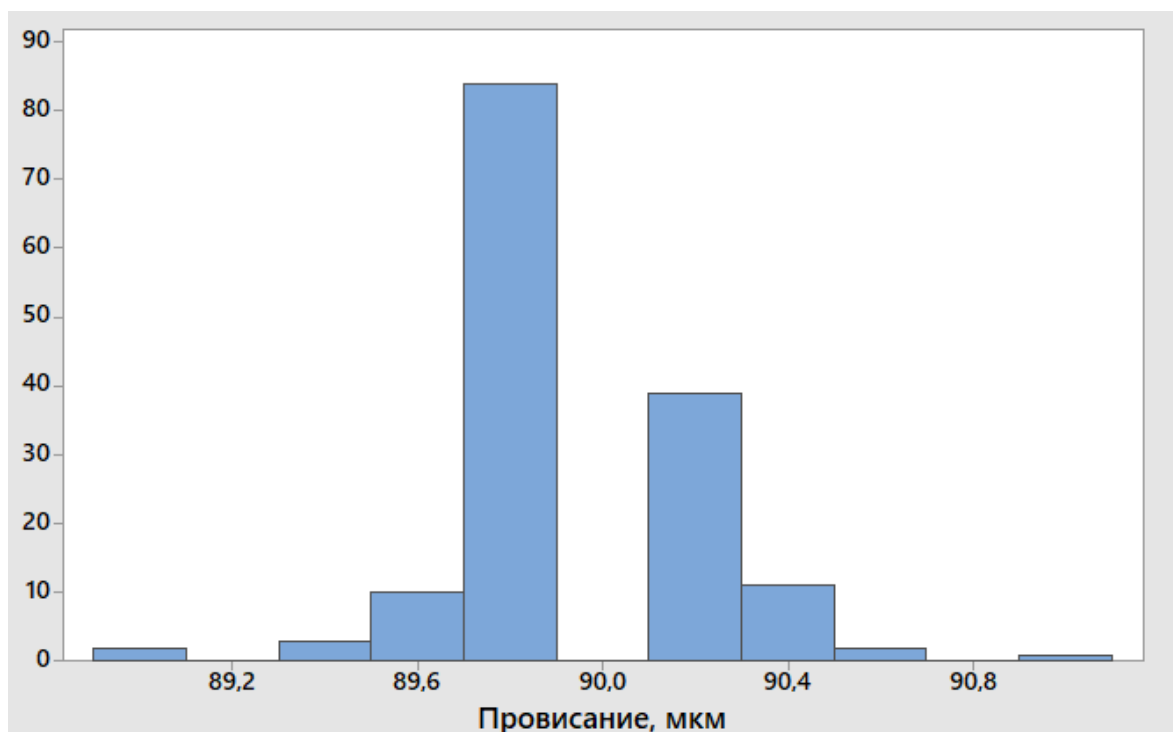


Рис. 4.6: Гистограмма максимального провисания проволоки

Среднее значение – 89,9 мкм; Среднеквадратичное отклонение – 0,3 мкм.

Учет электростатических сил

Смещение проволоки под силой тяжести создает среднее (от компоненты) электрическое поле

$$\langle E_y \rangle = - \frac{U*d}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)*b^2},$$

которое воздействует на электрический заряд провода и создает силу, которая стремится увеличить смещение, где a – диаметр проволоки, b – диаметр трубки, d – смещение проволоки. Это смещение можно посчитать по формуле:

$$\Delta h_e = \Delta h \frac{8}{k^2 * L^2} \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{kL}{2}\right)} - 1 \right) = \Delta h \frac{2}{q^2} \left(\frac{1}{\cos q} - 1 \right) = \Delta h f(q)$$

Где Δh - смещение под действием гравитационных сил, которое было вычислено ранее. Оценка формулы после Δh дает значение 1.003 при $q = 0.08$, что дает небольшой вклад в уже найденное значение (не больше 0.3%). Ниже приведен график зависимости $f(q)$ (рис. 4.7).

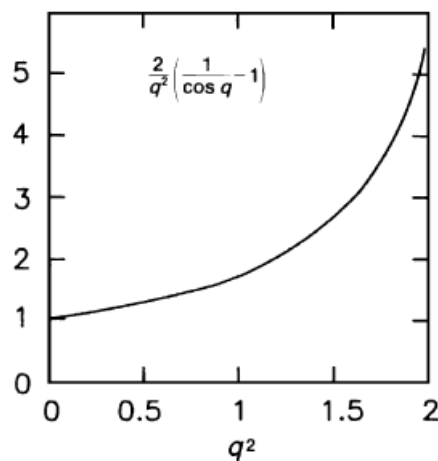


Рис. 4.7: Зависимость $f(q)$

Высоковольтные испытания

Сразу после сборки дрейфовая трубка поступает на высоковольтные испытания, цель которых выявление возможных дефектов проволоки (заусенцы, прилипший мусор и т.п.), электроизоляции торцевых элементов, дефектов внутреннего покрытия. Также важно отслеживать, чтобы трубки для одной камеры работали в одном диапазоне напряжений (200-300 В)

Процедура выявления такого рода дефектов (рис. 16) основана на измерении зависимости тока от высокого напряжения. Высокое напряжение отрицательной полярности подается на стенку трубки. При помощи специального усилителя измеряется ток анодной проволоки с разрешением 0.2 нА. Трубка при этом заполнена воздухом при нормальном давлении.

Процесс ВВ испытаний был автоматизирован и рассчитан на поиск возможных аномалий вольтамперных характеристик (рис.17). В базу данных заносились только результаты: номер трубки, напряжение (V500) при котором ток достигал 500 нА, значение тока при напряжении V500-30 В и V500-100 В. Если ток трубки при V500-30В превышал 0.8 нА, то такая трубка браковалась. С дефективными трубками можно проводить процедуру “лечения”, подавая потенциал противоположной полярности около 2 кВ на 10-20 мин. Ионы газа внутри трубки теперь будут двигаться в обратном направлении и бомбардировать заусеницы, пылинки и другой мусор, оказавшийся на сигнальной проволоке.

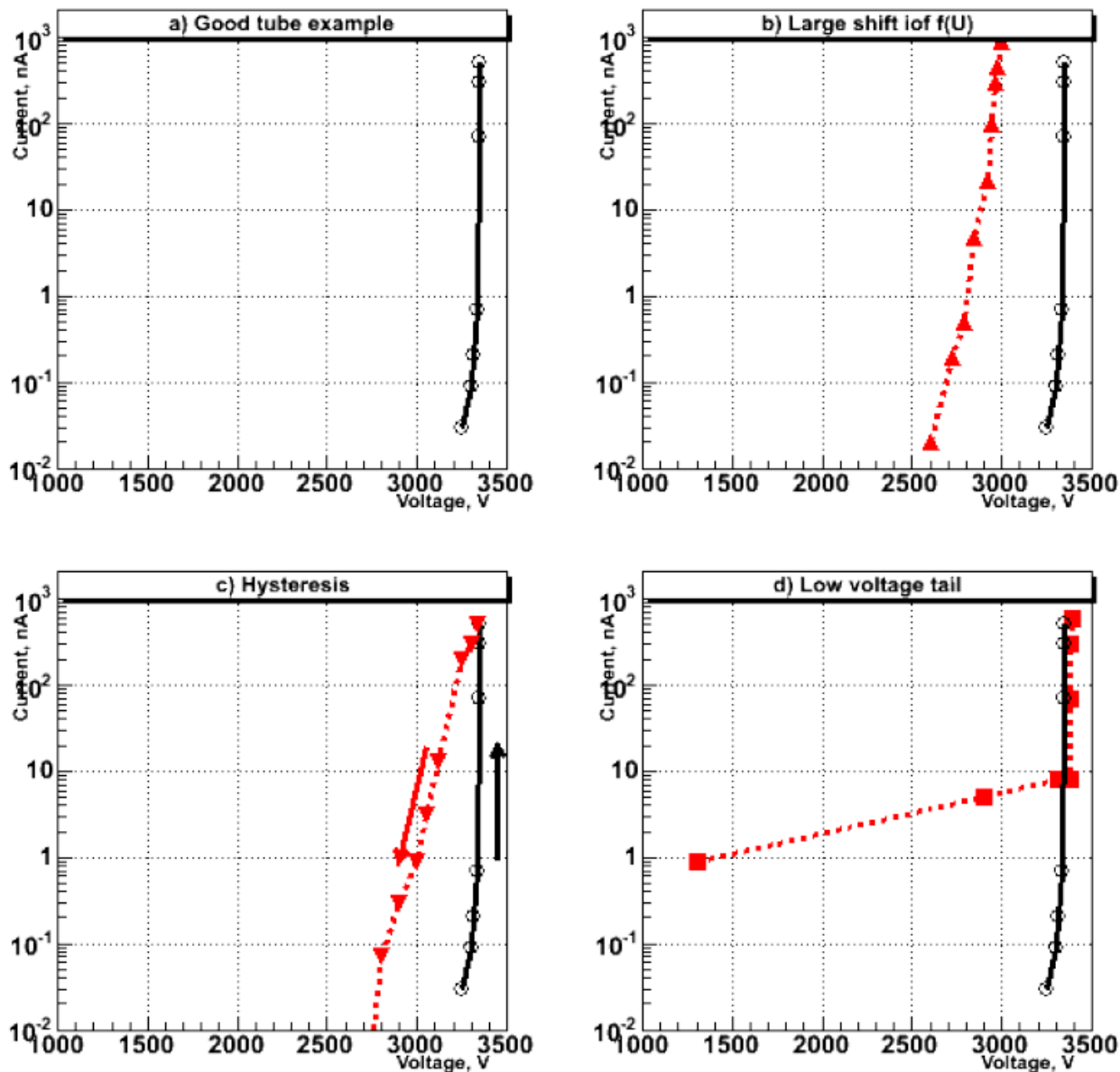


Рис. 4.8: Вольтамперные характеристики нормальной трубки (а) и трубок с дефектами (b-d).

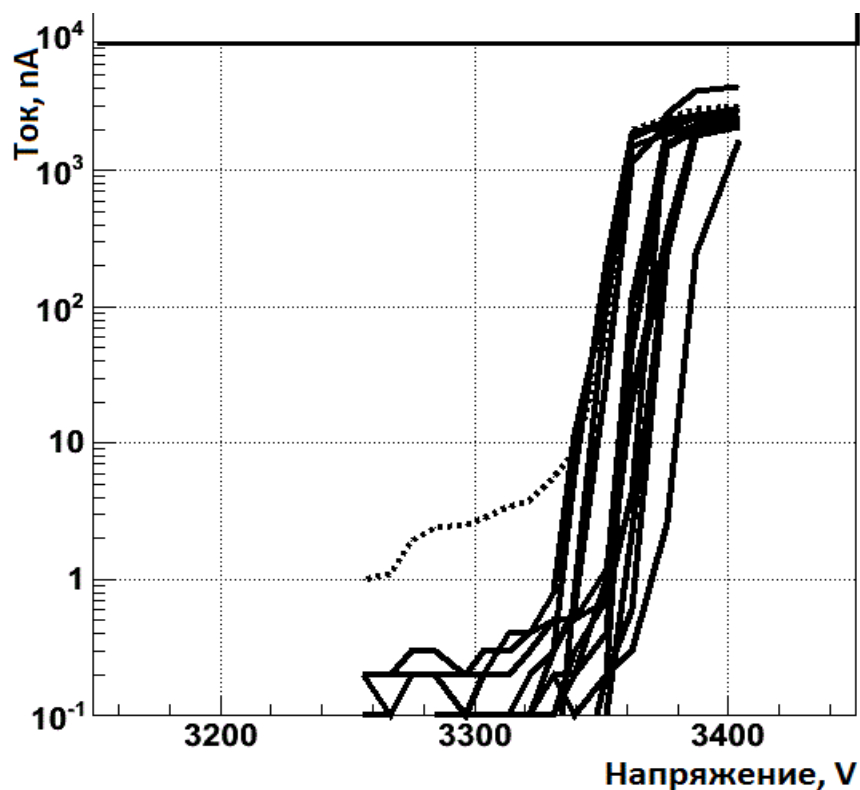


Рис. 4.9: Примеры вольтамперных характеристик нескольких трубок на испытательном стенде, бракованной трубке соответствует пунктирная

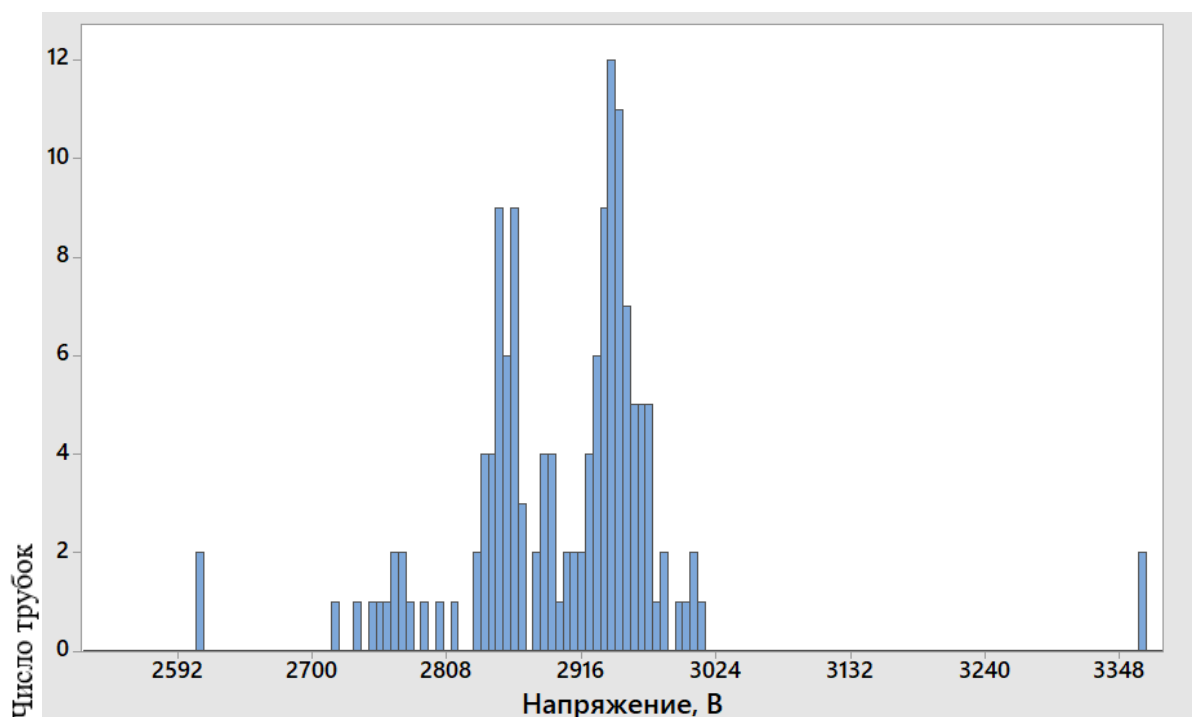


Рис. 4.10: Гистограмма напряжений начала коронного разряда

Среднее значение – 2903 В, Среднее отклонение – 90 В. Хорошие трубки собраны в диапазоне 300В.

Испытания трубок на герметичность



Рис. 4.11: Схема установки для испытаний на герметичность.

После успешного прохождения высоковольтных испытаний трубки должны пройти вакуумные испытания, чтобы исключить трубки с дефектами, через которые может быть утечка рабочей газовой смеси, что повлечет к ухудшению разрешающей способности всей камеры. Стенд испытаний на герметичность схематически изображен на рис. 19. Дрейфовая трубка помещается в вакуумную камеру. Один конец трубки герметично закрывается колпачком с резиновой прокладкой, а другой конец соединяется с форвакуумным насосом. Вакуумная камера откачивается до давления $\leq 10^{-5}$ мбар, затем откачивается внутренняя полость трубки и заполняется газовой смесью ($N_2 90\% + He 10\%$) до абсолютного давления 2 бар. Таким образом, во время испытания на герметичность, трубка нагружается избыточным давлением 2 бар. Герметичность дрейфовой трубки проверяется гелиевым течеискателем “Adixen ASM 310”. Гелий проникает в вакуумную камеру из дрейфовой трубки вследствие диффузии через лавсановую пленку и через возможные дефекты сварки и склейки. Поток гелия, регистрируемый течеискателем, записывается в базу данных через 2 мин после напуска газовой смеси в дрейфовую трубку. Величина измеренного потока за это время составляет $\sim 50\%$ от стационарного, который устанавливается через несколько

часов. Для трубки длиной 2.5 м гелиевая течь не должна превышать $2 \cdot 10^{-4}$ л·мбар/с. Это соответствует течи $2 \cdot 10^{-5}$ л·мбар/с по рабочему газу (ArCO_2).

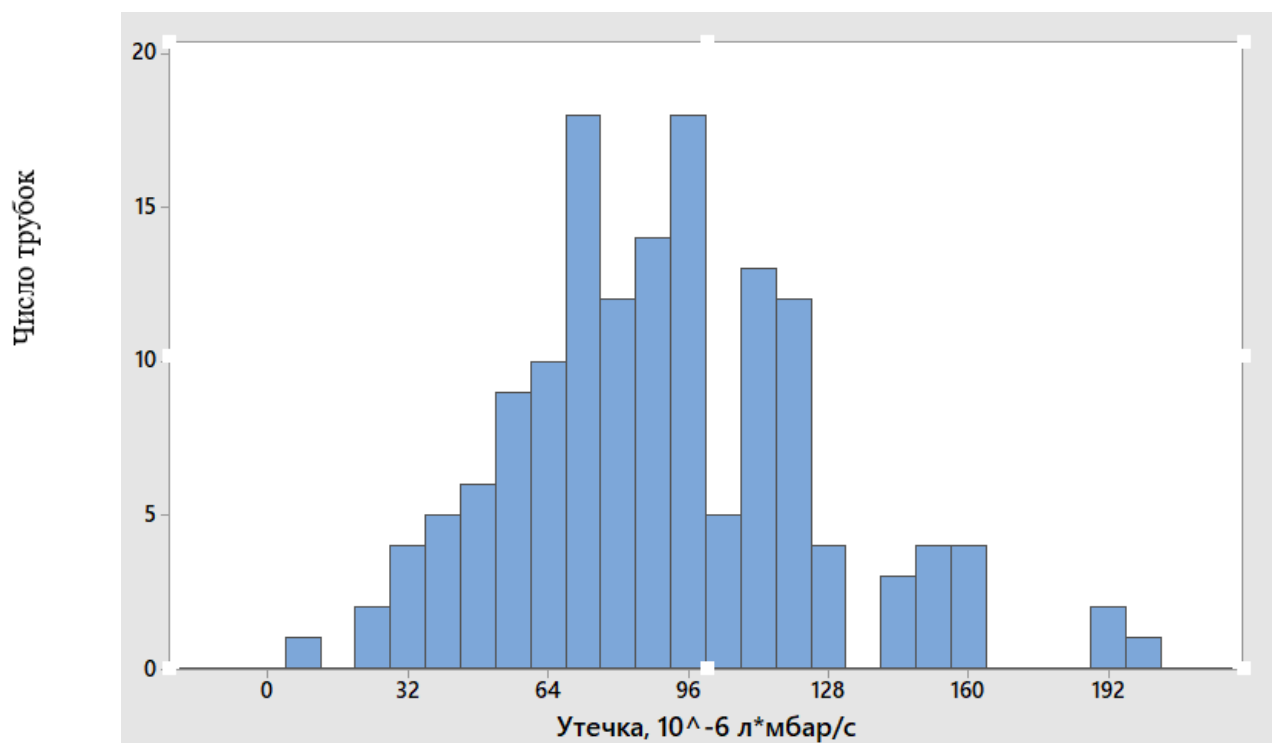


Рис. 4.12: Гистограмма утечки Гелия из трубок

Среднее значение – 89×10^{-6} л·мбар/с. Среднеквадратичное отклонение – 35×10^{-6} л·мбар/с. Трубки с утечкой больше 160×10^{-6} л·мбар/с не допускаются доклейки в камеру.

Заключение

В данной работе были представлены основные принципы работы, методика производства и тестирование 15 миллиметровых майларовых трубок длиной 2,5 метра. Была проведена систематизация и анализ характеристик данных трубок и представлены критерии допуска трубок до вклейки в камеру. По этим данным и критериям можно сделать вывод о пригодности трубок для склейки в камеру и их характеристиках.

Список литературы

- 1) Sauli F, «Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers.» Yellow Report CERN 77-09 (1977)
- 2) Н.И.Божко и др. Прецизионная дрейфовая трубка в лавсановом корпусе. Препринт ИФВЭ 2012-3; ПТЭ, №2, 2013, с. 16-21.
- 3) Божко Н.И и др. Камера из прецизионных дрейфовых трубок в лавсановом корпусе. Приборы и техника эксперимента, 2014, N4, с. 410-416
- 4) А. Кожин. Разработка трековых систем большой площади на основе дрейфовых камер для экспериментов в физике высоких энергий
- 5)Walter Blum, Werner Riegler, Luigi Rolandi. «Particle Detection with Drift Chambers»
- 6) Ёч С.К. «Прототип дрейфовой камеры из 15-мм лавсановых трубок»
- 7) Кондратьев А. Г. «Дрейфовые трубки диаметром 30 мм с лавсановым корпусом для изготовления прецизионной трековой камеры»