

Физическая аппаратура и её элементы

УДК 539.1.07

Контроль натяжения трубок в строу детекторах

А. Д. Волков

Рассмотрен монитор для контроля натяжения трубок в строу детекторах. Его работа основана на измерении резонансной частоты трубки при электростатическом возбуждении колебаний относительно опорного электрода. Высокая чувствительность монитора позволяет регистрировать резонансную частоту с точностью 0,1 Гц. Величина натяжения вычисляется с использованием полученной автором аналитической зависимости, которая в диапазоне натяжений 250—1200 гс имеет ошибку менее 3,5 %. Достигнутая точность подтверждается экспериментальными данными. Устройство отвечает самым высоким требованиям к созданию строу детекторов и может использоваться для измерения натяжения проволочек. Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем имени В. П. Джелепова.

PACS: 06.60.Mr.

Ключевые слова: строу детекторы, контроль натяжения трубки, электростатическое возбуждение, резонансная частота колебаний.

Введение

Нахождение резонансной частоты цилиндрической оболочки при действии на нее сил является часто встречающейся задачей в технике физического эксперимента. Такая задача, в частности, возникает при создании координатных строу детекторов [1—3].

Данные детекторы состоят из набора цилиндрических газоразрядных счетчиков, установленных в каркасе и образующих плоскости регистрации заряженных частиц. Внутренняя поверхность цилиндра металлизирована. Она служит катодом счетчика и одновременно играет роль экрана, обеспечивающим хорошую развязку между каналами и уменьшение шумов. По центру цилиндра устанавливается сигнальная проволочка, на которую подается высокое напряжение, а объем цилиндра заполняется газовой смесью. При исследовании физического процесса регистрируемые частицы пересекают объем цилиндра и, сталкиваясь

с молекулами газа, ионизируют их. В результате, образуются свободные электроны, дрейфующие к проволочке под действием электрического поля. Вблизи проволочки поле имеет большую величину и вызывает газовое усиление электронов. Каждая проволочка подключается к каналу регистрации, что позволяет по номеру сработавшего канала определить место прохождения частицы. Положение каждой проволочки в системе координат детектора с точностью 150—250 мкм определяется размерами цилиндра и технологией ее установки. Для уменьшения рассеяния регистрируемой частицы в веществе, толщина трубок минимизируется с учетом технологии изготовления и составляет 15—50 мкм, что обуславливает специфику их поведения.

Многие аспекты механического поведения тонкостенных цилиндрических счетчиков рассмотрены в теории оболочек [4—6]. Со временем из-за текучести диэлектрика размеры трубки изменяются, поэтому необходимо обеспечить ее работоспособность при длительной эксплуатации. Решением этой проблемы служит натяжение трубки, которое способствует сохранению ее формы и уменьшает величину провисания, что, в конечном итоге, улучшает координатное разрешение детектора. Натяжение обеспечивается с помощью избыточного давления рабочего газа в трубке [1] или механическим путем. Например, вариант механиче-

Волков Александр Дмитриевич, научный сотрудник.
Объединенный институт ядерных исследований.
Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Джелепова,
Россия, 141980, г. Дубна МО, ул. Жолио-Кюри, 6.
Тел. 8 (49621) 6-63-39. E-mail: adv@jinr.ru

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2014 г.

© Волков А. Д., 2014

ского натяжения трубок был принят при создании строу детектора в экспериментах NA62 и COMET [2, 3].

Натяжение влияет на характеристики детектора, поэтому является важным параметром. Его контроль осуществляется по резонансной частоте трубки. Целью данной работы была адаптация метода измерения натяжения проволоочки [7] для строу трубки и вывод зависимости резонансной частоты трубки от натяжения, используемой для его контроля.

Способ возбуждения колебаний трубки

Эффективным способом нахождения резонансной частоты трубки служит электростатическое возбуждение ее колебаний. Максимальная амплитуда колебаний достигается при действии силы возбуждения на резонансной частоте трубки. В результате, задача определения резонансной частоты сводится к нахождению максимальной амплитуды вынужденных колебаний трубки при сканировании частоты возбуждения.

На рис. 1 приведена блок-схема устройства для регистрации резонансной частоты строу трубки. Схемотехническая реализация основных узлов устройства регистрации, Драйвера и Сенсора, представлена в работе [7]. Драйвер формирует высоковольтный переменный сигнал, который подается на опорный электрод, располагаемый вблизи исследуемой трубки. Металлический катод трубки при тестировании соединяется с нулевым потенциалом. Опорный электрод и катод трубки образуют конденсатор. Под действием сигнала возбуждения на обкладках конденсатора индуцируются заряды противоположных знаков. Переменная сила кулоновского взаимодействия зарядов вызывает колебания трубки. Поскольку сила действует на обе обкладки, блокировка колебаний опорного электрода предотвращается с помощью увеличения его массы и крепления в подставке. Сенсор регистрирует колебания трубки. Он формирует сигнал, амплитуда которого пропорциональна отклонению трубки относительно электрода, а частота совпадает с частотой сигнала возбуждения. Попадание сигнала возбуждения в схему Сенсора блокируется с помощью конденсатора C_b и низкого входного сопротивления схемы Сенсора.

Определение резонансной частоты трубки связано с решением системы уравнений, описывающей ее поведение. Система содержит 5 уравнений и 8 неизвестных [4] и является неопределенной. К описанию поведения трубок в теории оболочек существует множество подходов [5, 6]. В условиях неопределенности существуют частные решения с учетом сделанных предположений. Основопологающими предположениями являются линейность

деформации оболочки и выполнение закона Гука. В связи с малой величиной деформации в вертикальном направлении ее влиянием пренебрегают. Поведение оболочки описывается через ее срединную часть. В работе [8] дан обзор различных подходов и результатов определения резонансной частоты трубки. В приведенных в обзоре работах отсутствует рассмотрение зависимости резонансной частоты трубки с фиксированными концами от величины ее натяжения. Вывод данной зависимости для строу трубки в настоящей работе сделан из условия ее равновесия при действии осесимметричных сил. Уравнение равновесия строу трубки имеет вид [4]:

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{Eh}{R} w = q_z - \frac{\mu}{R} N_x \quad (1)$$

где D — цилиндрическая жесткость трубки, $D = Eh^3/12(1-\mu^2)$; E — модуль Юнга; h — толщина трубки; μ — коэффициент Пуассона материала трубки; q_z — вертикальная составляющая действующих сил; N_x — продольная сила внутри цилиндра трубки.

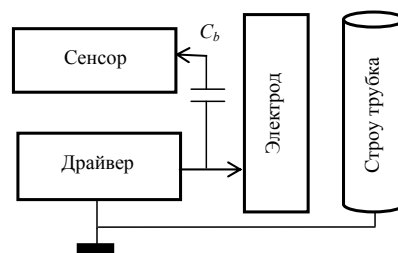


Рис. 1. Блок-схема устройства регистрации

Резонансная частота строу трубки

На рис. 2 показаны система координат, размеры трубки и действующие на нее силы.

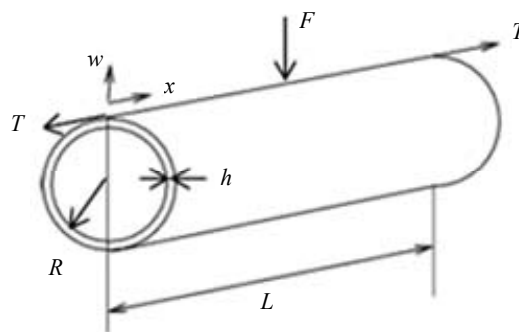


Рис. 2. Координатная система трубки и действующие на нее силы:

w, x — координаты трубки; характеристики трубки:
 R — радиус, L — длина, h — толщина;
 действующие силы: T — сила натяжения, F — внешняя сила возбуждения колебаний

Вертикальная составляющая включает силу натяжения ($T \cdot \partial^2 w / \partial x^2$), внешнюю силу F , прикладываемую к трубке для возбуждения колебаний, и силу инерции. Сила инерции по принципу Даламбера берется со знаком минус ($-\rho h \cdot \partial^2 w / \partial t^2$), где ρ — плотность материала трубки. В теории оболочек показано [4—6], что сила, действующая вдоль оси x , имеет составляющую в ортогональном направлении с коэффициентом μ/R . Поэтому в уравнение равновесия входит вертикальная составляющая продольной силы внутри трубки N_x . Для обеспечения малого провисания трубки, влияющего на координатное разрешение детектора сила натяжения трубки T имеет значительную величину. В этом случае ее можно считать определяющей и $N_x \cong T$. Сила N_x действует по касательной к поверхности трубки. Для проекции силы на ось w ее необходимо умножить на синус угла наклона трубки относительно оси x , т.е. на $\sin\varphi$. С учетом граничных условий отклонение трубки вдоль оси x берется теперь в виде:

$$w(x) = w_0 \cdot \sin(n\pi x)/L, \quad (2)$$

где w_0 — амплитуда отклонения в средней точке цилиндра. Ввиду малой амплитуды отклонения трубки вдоль оси x его распределение можно аппроксимировать линейной зависимостью. В этом случае тангенс угла наклона будет определяться отношением амплитуды w_0 к $L/2$, откуда $\tan\varphi \approx \sin\varphi = 2w_0/L$. Вертикальная составляющая силы натяжения действует по нормали к поверхности трубки, поэтому для получения ее проекции на ось w нужно умножить на $\cos\varphi$, значение которого для малого угла берется равным единице.

Для трубки с закрепленными концами, находящейся под натяжением T , уравнение свободных колебаний включает силы, действующие внутри оболочки, и силу инерции. Все силы в уравнении берутся на единицу длины соответствующего им нормального сечения. В результате, уравнение (1) будет иметь вид:

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{Eh}{R^2} w + \frac{T}{2\pi R} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\mu T}{RL} \cdot \frac{2w}{L} = -\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) ищется в виде:

$$w = w_0 \cdot \sin\left(\frac{n\pi x}{L} \cdot \cos \omega t\right). \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в уравнение (3) и затем сокращая на общий множитель (4), получим формулу резонансной частоты цилиндрической трубки ω_C :

$$\omega_C^2 = \frac{D}{\rho h} \left(\frac{n\pi}{L}\right)^4 + \frac{E}{\rho R^2} + \frac{T}{2\pi R \rho h} \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \cdot \left[1 + \frac{4\mu}{\pi n^2}\right]. \quad (5)$$

Резонансная частота является функцией натяжения и параметров трубки. Она включает три составляющие, соответствующие изгибным ω_b , поперечным ω_t и продольным колебаниям ω_L . Квадраты этих резонансных частот последовательно представлены в выражении (5). Сделаем сравнительную оценку частот для первой гармоники ($n = 1$) трубки строу детектора СОМЕТ с параметрами: $T = 9,8$ Н; $L = 0,975$ м; $R = 5$ мм; $h = 36$ мкм; $\rho = 1290$ кг/м³; $E = 2 \cdot 10^9$ Н/м; $\mu = 0,3$.

$$\omega_b^2 / \omega_L^2 = \frac{2\pi R D \pi^2}{T L^2 (1 + 4\mu / \pi n^2)} \approx 0,3 \cdot 10^{-6}$$

$$\omega_t^2 / \omega_L^2 = \frac{2\pi h E L^2}{T \cdot (1 + 4\mu / \pi n^2) R \pi^2} \approx 6,7 \cdot 10^6.$$

Ввиду большого отличия резонансных частот контроль натяжения можно с высокой точностью осуществлять с учетом только продольной составляющей ω_L :

$$\omega_L^2 = \frac{T}{2\pi R \rho h} \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \cdot \left[1 + \frac{4\mu}{\pi n^2}\right]. \quad (6)$$

Полученная зависимость находится в согласии с результатами работы [9]. В обеих работах квадрат резонансной частоты зависит линейно от натяжения. При этом, в отличие от [9], не требуется вычисления ее момента инерции и изгибающей силы.

Режим измерения резонансной частоты трубки

Резонансная частота трубки определяется из условия максимальной амплитуды вынужденных колебаний. Рассмотрим характеристики и ограничения данного режима. В этом случае в уравнение колебаний (3) добавляется действие внешней силы возбуждения F . Силу можно оценить из закона сохранения энергии:

$$F = \frac{dC}{dH} \cdot \frac{U^2}{2}. \quad (7)$$

В выражении (7) приняты обозначения: C — емкость конденсатора, образованного трубкой относительно опорного электрода; H — эффективное расстояние между обкладками конденсатора; U — напряжение возбуждения колебаний, прикладываемое к опорному электроду. Для оценки расстояния между обкладками конденсатора H необходимо учесть цилиндрическую форму трубки. В результате, эффективное расстояние увеличива-

ется на $(\pi - 2)R/\pi$. Емкость можно оценить по формуле плоского конденсатора с учетом эффективного расстояния между обкладками. Подставляя значение емкости в выражение (7), силу получим в явном виде:

$$F = -CU^2/2H. \quad (8)$$

Решение уравнения вынужденных колебаний ищется в форме, аналогичной свободным колебаниям (4). Для этого действующая сила раскладывается в ряд Фурье на сегменте $(0, L)$ в системе ортогональных функций отклонения трубки в виде

$\left\{ \sin \frac{n\pi x}{L} \right\}_{n=1}^{\infty}$. Коэффициенты разложения f_n определяются по формуле Фурье–Эйлера [10, 11]:

$$\begin{aligned} f_n &= \frac{2}{L} \int_0^L \frac{F(t)}{m} \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} \cdot dx = \\ &= \frac{2F(t)}{n\pi \cdot 2\pi R h L \rho} (1 - \cos n\pi). \end{aligned} \quad (9)$$

Коэффициенты равны нулю для четных гармоник, а для нечетных составляют:

$$f_{2k-1} = \frac{CU^2}{H \cdot (2k-1)\pi^2 R h L \rho}. \quad (10)$$

Из выражения (9) следует, что колебания трубки возможны только на частоте нечетных гармоник. Коэффициенты f_{2k-1} соответствуют ускорению оболочки при ее колебании. В общем случае, решение уравнения вынужденных колебаний включает решение однородного уравнения (4) и частное решение, связанное с действием внешней силы F . Частное решение представляет собой сумму амплитуд колебаний, определяемых сверткой действующей силы с функцией временного поведения трубки [11]:

$$\begin{aligned} w(x, t, F) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_{2k-1}} \times \\ &\times \left[\int_0^t f_{2k-1}(\tau) \cdot \sin \omega_{2k-1} \cdot (t - \tau) d\tau \right] \cdot \sin \frac{n\pi x}{L}. \end{aligned} \quad (11)$$

В приведенном выражении ω_{2k-1} — нечетные гармоники собственных колебаний трубки, τ — переменная свертки. Напряжение возбуждения колебаний целесообразно выбрать в виде $U = U_0(1 - \cos \omega t)$ с амплитудой U_0 и частотой ω . Такая форма напряжения позволяет упростить аппаратную реализацию Драйвера. Поскольку сила возбуждения зависит квадратично от напряжения, это приводит к появлению в ее составе второй гармоники, вызывающей колебания с меньшей амплитудой, по сравнению с первой гармоникой:

$$(1 - \cos \omega t)^2 = 1,5 - 2 \cos \omega t + 0,5 \cos 2\omega t. \quad (12)$$

Процедура вычисления интеграла (11) представлена в работах [4, 15]. Он включает сумму трех интегралов $J = J_1 + J_2 + J_3$. Амплитуда $w(J_1)$ обратно пропорциональна кубу номера гармоники и квадрату резонансной частоты первой гармоники ω_1 :

$$w(J_1) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{f_{2k-1} \cdot [1 - \cos \omega_{2k-1} t]}{\omega_{2k-1}^2}. \quad (13)$$

Выражение (13) указывает на колебания трубки на резонансных частотах в фазе с сигналом возбуждения. Ввиду малости и невозможности регистрировать амплитуду колебаний, связанную с членом $w(J_1)$, им можно пренебречь. При совпадении частоты возбуждения с частотой нечетных гармоник трубки $\omega = \omega_{2k-1}$ наступает резонанс, при котором амплитуда колебаний будет определяться выражением:

$$w(J_2) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{f_{2k-1} \cdot t \cdot \sin \omega_{2k-1} t}{\omega_{2k-1}}. \quad (14)$$

Наличие в спектре сигнала возбуждения второй гармоники $\cos 2\omega t$ так же позволяет возбудить колебания трубки на нечетных гармониках. При частоте сигнала $\omega = 0,5\omega_{2k-1}$ амплитуда колебаний $w(J_3)$ в четыре раза меньше амплитуды $w(J_2)$:

$$w(J_3) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{f_{2k-1} \cdot t \cdot \sin \omega_{2k-1} t}{4\omega_{2k-1}}. \quad (15)$$

Поэтому поиск резонансной частоты предпочтительно осуществлять на первой гармонике сигнала возбуждения. На резонансной частоте амплитуда колебаний возрастает благодаря временному фактору t , а фаза сдвигается относительно сигнала возбуждения на $\pi/2$ вследствие множителя $\sin \omega_{2k-1} t$. Рост амплитуды выше стационарного значения ограничивается силами упругости трубки, а ее затухание компенсируется действием силы возбуждения.

Анализ вынужденных колебаний, согласно выше изложенной модели, показывает наличие только нечетных гармоник и возможность возбуждения резонанса на частоте равной половине частоты нечетной гармоники трубки. Модели колебаний цилиндрической оболочки, используемые в работах [9, 12], допускают наличие четных гармоник резонансной частоты продольных колебаний трубки, что не согласуется с полученными результатами. На основании многочисленных экс-

периментальных данных в работе [13] также отмечается наличие только нечетных гармоник продольных колебаний ω_L и взаимосвязанных с ними частот поперечных колебаний ω_T . Авторами W. Flugge и G. Chiang была предложена модель, в которой весь спектр частот представлялся двумя наборами нечетных гармоник [14]. Однако этот подход не нашел применения. Приведенный анализ частот собственных колебаний трубки может представлять интерес при проектировании защиты от вибрации цилиндрических конструкций малой толщины.

Характеристики системы регистрации

Опорный электрод имел размеры $400 \times 8 \times 3$ мм и был выполнен из дюралюминия. Электрод вставлялся в паз в боковой грани подставки из фторопласта $40 \times 40 \times 30$ мм и фиксировался с помощью прижимной планки, обеспечивающей его неподвижность. С целью формирования симметрии силы возбуждения по длине, электрод при тестировании предпочтительно устанавливали симметрично относительно трубки. Расстояние между трубкой и опорным электродом составляло 6–7 мм. На рис. 3 приведена осциллограмма колебаний трубки на резонансной частоте, вызываемых первой гармоникой сигнала возбуждения. При использовании второй гармоники сигнала возбуждения частота регистрируемого сигнала вдвое превышает частоту сигнала возбуждения, а амплитуда сигнала по сравнению с амплитудой в первом случае падает в 3 раза. В пределах ошибки измерения, равной 0,1 Гц, регистрируемая частота в обоих случаях равна ω_1 .

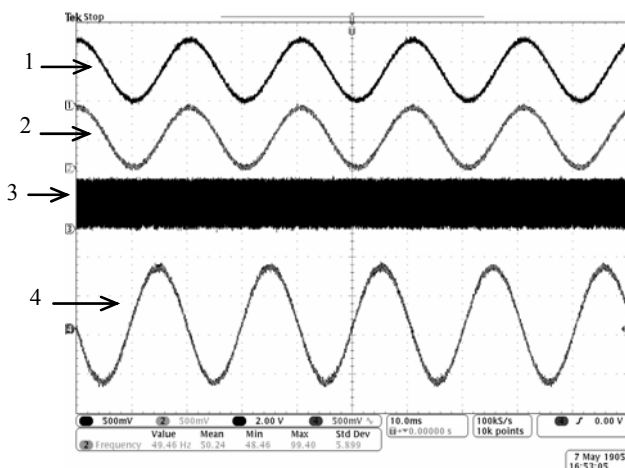


Рис. 3. Первая гармоника резонансных колебаний трубки. Сигналы на осциллограмме:

1 — входной сигнал управления Драйвером; 2 — контроль высоковольтного сигнала возбуждения; 3 — высокочастотный сигнал управления Сенсором; 4 — сигнал регистрации колебаний трубки с частотой 49,6 Гц при натяжении трубки 1000 гс

Точность регистрации резонансной частоты зависит от чувствительности Сенсора. С целью получения высокой чувствительности Сенсор реализован по схеме резонансного LC-контура. В качестве емкости контура используется емкость опорного электрода относительно катода трубки. На рис. 4 показано поведение амплитуды сигнала Сенсора вблизи резонансной частоты. Полная ширина распределения на полувысоте (FWHM) составляет 1,1 Гц, что показывает хорошую избирательность контура. Чувствительность Сенсора можно оценить по изменению амплитуды регистрируемого сигнала в интервале частоты возбуждения, равной полуширине распределения.

Для первой гармоники сигнала возбуждения чувствительность в области резонансной частоты трубки составила 530 мВ/Гц. Такая высокая чувствительность позволяет определять резонансную частоту с точностью 0,1 Гц. Чувствительность для второй гармоники возбуждения равна 455 мВ/Гц.

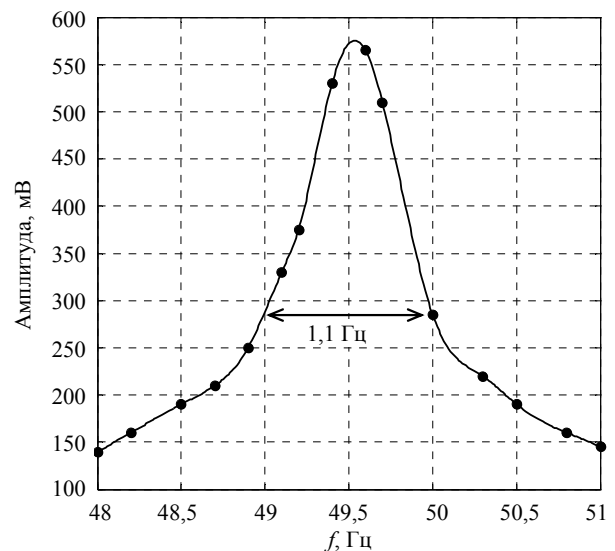


Рис. 4. Амплитудно-частотная зависимость сигнала регистрации

Результаты проверки

Проверка зависимости резонансной частоты от натяжения (6) проводилась на трубках прототипа строу детектора СОМЕТ с характеристиками, приведенными выше. В концы трубки вклеивались наконечники, которые жестко крепились на неподвижном основании. Внутри наконечника имелся винт, позволяющий при вращении задавать натяжение трубки. Контроль натяжения осуществлялся с помощью динамометра, имеющего точность измерения 25 грамм-силы. При заданном натяжении измерялась резонансная частота трубки. Для достижения максимальной точности определения резонансной частоты ω_1 ее поиск осуществлялся на первой гармонике сигнала возбуждения.

Амплитуда сигнала возбуждения U_0 составляла 300 В. На рис. 5 приведены результаты измерений, отмеченные знаком •, в сравнении с аналитической зависимостью (6), представленной на рисунке линией. Результаты измерений и проверки влияния факторов на определение резонансной частоты приводятся ниже.

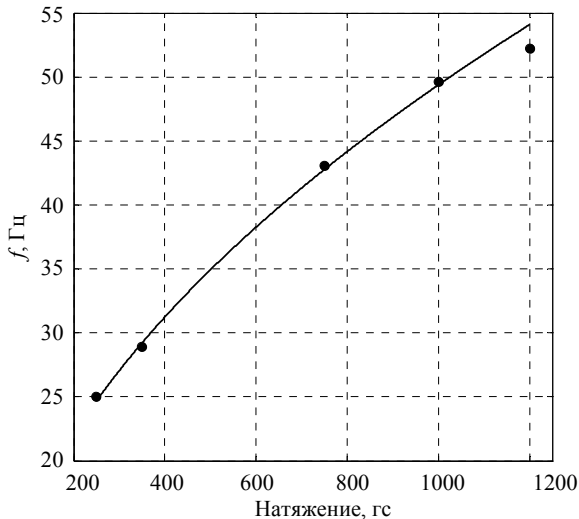


Рис. 5. Зависимость резонансной частоты от натяжения трубки

1) Отклонение экспериментальных данных от аналитической зависимости в диапазоне натяжений 250—1000 гс составляет менее 1 %. Смещение опорного электрода на $0,5 R$ относительно центра трубки не приводит к изменению значения регистрируемой частоты. Амплитуда сигнала в этом случае падает в 2—3 раза.

2) При натяжении свыше 1000 гс отмечается отклонение измеряемой частоты от аналитического значения, что объясняется нарушением линейности деформации трубки. При натяжении 1200 гс отклонение составляет 3,5 %.

3) В диапазоне частот 10—1500 Гц при максимальной амплитуде сигнала возбуждения $U_0 = 650$ В проверялась возможность возбуждения других мод колебаний трубки. Возбудить продольные колебания трубки на других гармониках не удается вследствие сильного затухания амплитуды колебаний, пропорционального квадрату номера гармоники, и недостаточной величины силы возбуждения. Поперечные колебания трубки в указанном диапазоне частот возбудить также не удалось. Данная проверка подтвердила отсутствие факторов, влияющих на точность регистрации резонансной частоты f_L , используемой для контроля натяжения трубки.

Заключение

Представленная система измерения натяжения проволочек адаптирована к измерению натяжения

трубок строу детекторов. Включение в систему регистрации опорного электрода позволяет применить электростатическое возбуждение колебаний трубки для определения ее резонансной частоты, характеризующей натяжение. Способ возбуждения колебаний надежно работает в диапазоне натяжений трубок, используемых для детекторов, и удобен в применении.

Устройство имеет высокую чувствительность и позволяет измерять резонансную частоту с точностью 0,1 Гц. Его можно использовать для измерения натяжения сигнальной проволочки. В этом случае сигнал возбуждения подается на проволочку при заземленном катоде.

Получена зависимость резонансной частоты трубки от натяжения для контроля его величины. Показано наличие только нечетных гармоник колебаний строу трубки. Данный вывод подтверждается другими авторами. В диапазоне натяжений 250—1000 гс зависимость позволяет определить натяжение с точностью 1 %, что соответствует натяжению в 10 грамм-силы и отвечает самым высоким требованиям к созданию строу детекторов. При натяжении трубки свыше 1000 гс наступает нелинейная деформация трубки, и ошибка определения натяжения возрастает.

Автор выражает глубокую благодарность С. А. Мовчан и Т. Л. Еник за помощь в отладке устройства измерения при работе с трубками детектора NA62; коллегам S. Mihara и H. Nishiguchi — за помощь в измерении натяжения трубок прототипа строу детектора COMET.

Литература

1. Technical designed report for the PANDA Straw Tube Tracker.
2. NA62. Technical Design Document.
3. Experimental Proposal for Phase – 1 of the COMET Experiment at J – PARC. KEK/J – PARC – PAC 2012 – 10.
4. Ventsel E., Krauthammer Th. Thin plates and shells: Theory, Analysis and Applications. - Marcel Dekker, Inc., 2001.
5. Amabili M. Nonlinear vibrations and stability of shells and plates. - Cambridge University Press, 2008, p. 29—50.
6. Leissa A. W. Vibration of shells. - Acoustical society of America, 1993.
7. Volkov A. D. // Nucl. Instr. and Meth. 2013. V. A701. P. 80
8. Farshidianfar A., Olizadeh P. // Int. Journal of Mechanics and Applications. 2012. V. 2. No. 5.: P. 74
9. Bozich W. F. Technical Report AFFDL – TR – 67 – 28.
10. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. Наука, Москва, 1999.
11. Мартинсон Л. К., Малов Ю. И. Дифференциальные уравнения математической физики. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.

12. Pellicano F. // Journal of Sound and Vibration. 2007. V. 303. P. 154.

13. Yamaki N. Elastic stability of circular cylindrical shells. - North-Holland Series in Applied Mathematics & Mechanics, 1984.

14. Flugge W., G. Chiang C. M. // Int. J. Solid Structures. 1971. V. 7. P. 1109.

15. Volkov A. D. Study of wire oscillation processes in stretching measurement. Preprint E13-2005-198, JINR, Dubna, 2005.

Tubes tension control in straw detectors

A. D. Volkov

Joint Institute for Nuclear Research
Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems
6 Jouly Curie str., Dubna, 141980, Russia
E-mail: adv@jinr.ru

Received September 10, 2014

A device and a method for controlling tension of tubes in straw detectors are presented. The method is based on measuring the resonance frequency of a tube at electrostatic excitation of its oscillations relative to the reference electrode. The high sensitivity of the device allows the resonance frequency to be detected with an accuracy of 0.1 Hz. The tension is determined using analytical dependence obtained by author. The relative error of the experimental data against the analytical dependence in the range of tensions 250—1200 g is below 3.5 %. The achieved accuracy is confirmed by experimental data. The device meets the highest requirements for the creation of straw detectors, and it can be employed for measuring tension of wires. The work was performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems.

PACS: 06.60.Mr.

Keywords: straw detectors, tube tension control, electrostatic excitation, resonance frequency of straw tube.

References

1. Technical designed report for the PANDA Straw Tube Tracker.
2. NA62. Technical Design Document.
3. Experimental Proposal for Phase – 1 of the COMET Experiment at J – PARC. KEK/J – PARC – PAC 2012 – 10.
4. E. Ventsel and Th. Krauthammer, *Thin plates and shells: Theory, Analysis and Applications*. (Marcel Dekker, Inc., 2001).
5. M. Amabili, *Nonlinear vibrations and stability of shells and plates*. (Cambridge University Press, 2008).
6. A. W. Leissa, *Vibration of shells*. (Acoustical society of America, 1993).
7. A. D. Volkov, Nucl. Instr. and Meth. **A701**, 80 (2013)
8. A. Farshidianfar and P. Olizadeh, Int. Journal of Mechanics and Applications. **2** (5), 74 (2012)
9. W. F. Bozich, Technical Report AFFDL – TR – 67 – 28.
10. A. A. Tikhonov and A. A. Samarsky, *Equations of Mathematical Physics* (Nauka, Moscow, 1999) [in Russian].
11. L. K. Martinson and Yu. I. Malov, *Differential Equations of Mathematical Physics* (MGU, Moscow, 2002) [in Russian].
12. F. Pellicano, Journal of Sound and Vibration **303**, 154 (2007).
13. N. Yamaki, *Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells*. (North-Holland Series in Applied Mathematics & Mechanics, 1984).
14. W. G. Flugge and C. M. Chiang, Int. J. Solid Structures **7**, 1109 (1971).
15. A. D. Volkov, Preprint E13-2005-198, JINR, Dubna, 2005.