

P13-2017-96

А. Д. Волков *, П. Г. Евтухович, А. С. Моисеенко,
Б. М. Сабиров, З. Цамалаидзе, Н. Цверева

**ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ
НА НАТЯЖЕНИЕ СВАРНЫХ СТРОУ**

Направлено в журнал «Успехи прикладной физики»

* E-mail: adv@jinr.ru

Волков А. Д. и др.

P16-2017-96

Влияние внутреннего давления на натяжение сварных строу

Представлены теоретический анализ и результаты экспериментальной проверки влияния внутреннего давления на натяжение сварных тонкостенных трубок из майлара — строу, используемых для создания трековых детекторов. Исследования показали, что при определенных условиях натяжение строу остается постоянным. Существенное влияние на натяжение оказывает перепад давления на торцевых заглушках. В зависимости от конструкции обеспечения строу газовой смесью перепад давления может отсутствовать. При этих условиях в вакууме строу будет подвергаться воздействию поперечного напряжения, которое частично уменьшает ее ползучесть, что увеличивает срок службы строу. Наличие перепада давления может вносить вклад в увеличение ползучести. Результаты проверки влияния давления подтверждают полученные зависимости, на которые можно опираться при создании строу детекторов для работы в вакууме. Предложена новая методика измерения коэффициента Пуассона готовой строу, значение которого требуется для оценки влияния перепада давления на натяжение сварных строу. Для трубок детектора COMET его значение равно 0,338.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2017

Volkov A. D. et al.

P13-2017-96

Influence of Internal Pressure on Stress of Welded Straws

The theoretical analysis and results of testing the influence of internal pressure on the tension of welded thin-wall tubes from Mylar — straws, used for the creation of track detectors — are presented. Investigations have shown that under certain conditions the straw tension remains constant. A significant effect on the straw tension is exerted by a pressure difference on the end caps. Depending on the design of the gas supply, the pressure drop may be absent. Under this condition in a vacuum straw will be affected by a transverse stress, which partially reduces its creep that increases the service life of the straw. The presence of a pressure difference can contribute to an increase in creep. The test results of the pressure influence confirm the obtained dependences, which can be relied upon in the creation of straw detectors for operation in vacuum. A specific technique for measuring a real straw's Poisson ratio is proposed. This value is required to evaluate the effect of pressure on the tension of welded straws. Its value for the straw tubes of the COMET detector is 0.338.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2017

ВВЕДЕНИЕ

В технике физического эксперимента широкое применение нашли детекторы на основе тонкостенных трубок из пленки майлара — строу. В собранном виде строу является цилиндрическим дрейфовым детектором. Внутренняя поверхность пленки покрывается металлом, который служит катодом дрейфового детектора. Одновременно катод является экраном, уменьшающим взаимное влияние сработавших строу. Сигнальная проволочка крепится в контактах, расположенных в заглушках строу. Помимо контактов заглушки имеют отверстия для подачи рабочей газовой смеси. В процессе работы трубка должна сохранять свою форму. В противном случае электрическое поле внутри трубки будет неоднородным, что приведет к потере точности определения местоположения трека заряженной частицы, пролетевшей через трубку. В современных исследованиях, как правило, детекторы должны работать в вакууме. Поэтому для сохранения формы под действием перепада давления, силы тяжести и ползучести материала во времени строу должны быть предельно натянутыми. Характеристики и принцип работы строу, созданных методом навивки на стержень двух слоев пленки и их склеивания, приведены в [1]. В ОИЯИ разработана технология изготовления строу методом ультразвуковой сварки [2]. Сварные строу отличаются высокой прочностью и могут длительно работать в вакууме. Они нашли широкое применение при создании координатных детекторов [3–5]. Тем не менее использование строу в условиях перепада внутреннего давления выявило наличие некоторых проблем, одна из которых — его влияние на натяжение строу. Автор [6] столкнулся с проблемой вращения строу под действием внутреннего давления, причина которого осталась невыясненной. Вращение строу стали блокировать путем их склеивания в общий массив [7]. Целью работы было проведение анализа влияния давления на свойства строу в рамках теории деформации оболочек [8–11] и экспериментальной проверки полученных зависимостей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ СТРОУ

Поведение строу под действием сил в работе рассматривается с использованием уравнения равновесного состояния цилиндрической оболочки. Аналитическое решение уравнения равновесия описывает изменение радиуса строу вдоль оси X под действием приложенных сил. На рис. 1 показаны система

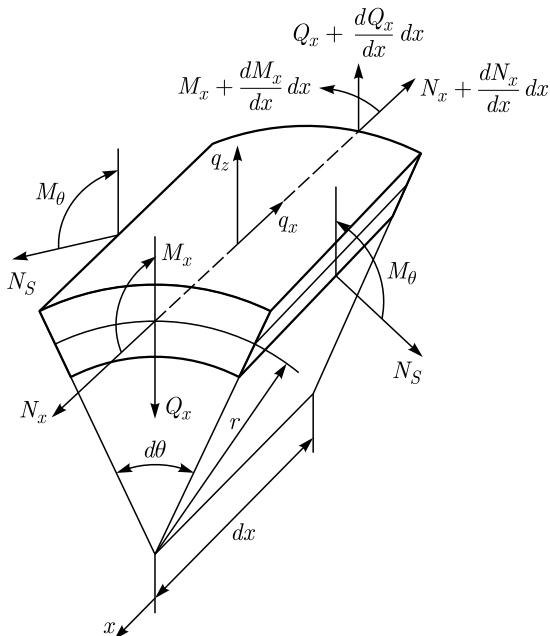


Рис. 1. Действующие силы и моменты в цилиндрической оболочке

координат элемента оболочки, направление действующих сил и моментов. В общем случае к элементу оболочки приложены внешние распределенные нагрузки q_x и q_z и вызываемые ими моменты M_x и M_θ .

Силы N_x и N_θ характеризуют их суммарное воздействие в поперечном сечении оболочки. При рассмотрении поведения оболочки под воздействием внешних сил результирующие силы N_x, N_θ и моменты M_x, M_θ прикладываются к ее срединному слою. Значения сил определяются соотношениями

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz \text{ и } N_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta dz, \text{ где } \sigma_x \text{ и } \sigma_\theta \text{ — напряженности в направлении осей } X \text{ и } \theta \text{ на высоте } z.$$

Рис. 1 и уравнение равновесия оболочки взяты из работы [12]. Применительно к рассматриваемой задаче на строу вдоль оси X действует сила натяжения T_0 , создающая напряжение $\sigma_x = q_x$. Перепад давления на стенку трубки вызывает напряжение q_z . Из условия равновесия элемента образца следует, что силы и моменты на его концах должны действовать в противоположных направлениях. Действие сил натяжения и перепада давления является симметричным относительно центральной оси строу. Влияние веса строу не учитывается, так как его величина по сравнению с действующими силами является малой. В зависимости от радиуса и толщины стенки вес строу составляет 0,4–1,2 г/м.

В данной работе рассматриваются строу с изотропными свойствами материала, для которых без учета силы тяжести уравнение равновесия имеет вид

$$\frac{d^4 w}{d^4 x} + 4\beta^4 w = \frac{1}{D} \left(q_z - \frac{\mu}{R} N_x \right), \quad (1)$$

где w — величина деформации срединного слоя строу, равная изменению ее радиуса под действием сил; β — характерный параметр строу; D — цилиндрическая жесткость строу на изгиб; μ — коэффициент Пуассона материала строу, характеризующий относительную деформацию тела в ортогональном направлении под действием относительной деформации в продольном направлении; q_z — напряженность силы, действующей на трубку в радиальном направлении; N_x — сила, действующая вдоль оси X в строу; R — внутренний радиус строу; E — модуль упругости материала строу; h — толщина стенки строу. Цилиндрическая жесткость D и параметр β выражаются соотношениями

$$D = Eh^3/12(1 - \mu^2), \quad (2)$$

$$\beta^4 = 3(1 - \mu^2)/R^2 h^2. \quad (3)$$

В работе основное внимание было уделено исследованию сверхтонких строу со следующими параметрами: $h = 20$ мкм, $R = 4,9$ мм; модуль упругости $E = 4,44 \cdot 10^9$ Н/м² и коэффициент Пуассона $\mu = 0,338$. Модуль Юнга был определен по зависимости относительной деформации от величины приложенного напряжения [13]. При указанных параметрах строу значения D и β^4 составляют $D = 3,3392 \cdot 10^{-6}$ Н·м, $\beta^4 = 2,767 \cdot 10^{14}$ м⁻⁴. Трубки с такими свойствами используются при создании строу детектора для первой фазы эксперимента СОМЕТ [4].

В уравнение (1) входит напряженность q_z , которая равна разности внутреннего и внешнего давления на стенку, и продольная сила N_x , определяемая натяжением строу T_0 . При работе строу с перепадом давления P (атм) напряженность $q_z = P$. В теории оболочек силы выражаются на единицу длины или площади ее действия [12], поэтому плотность силы N_x в уравнении (1) составит $N_x = T_0/2\pi R$. С учетом значений N_x и q_z уравнение (1) примет вид

$$\frac{d^4 w}{d^4 x} + 4\beta^4 w = \frac{1}{D} \left(P - \frac{\mu}{2\pi R^2} T_0 \right). \quad (4)$$

РЕШЕНИЕ ОДНОРОДНОГО УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ СТРОУ

Решение уравнения (4) включает решение однородного уравнения $w_1(x)$ и частное решение уравнения $w_2(x)$. Решение однородного уравнения (5)

приведено в [14]:

$$\frac{d^4 w}{d^4 x} + 4\beta^4 w = 0, \quad (5)$$

$$w_1(x) = \frac{e^{-\beta x} [\beta M_x (\sin \beta x - \cos \beta x) - Q_0 \cos \beta x]}{2\beta^3 D}. \quad (6)$$

Изгибающий момент M_x и плотность поперечной силы Q_0 определяются соотношениями $M_x = -D(d^2 w/dx^2)$ и $Q_x = -D(d^3 w/dx^3)$ [13]. Значения M_x и Q_x находятся из условия равенства нулю прогиба и наклона строу в точках крепления $x = 0, L$. В этих точках значения M_x и Q_x достигают максимальной величины: $M_0 = P/2\beta^2$, $Q_0 = -P/\beta$. Для строу с указанными параметрами изменение радиуса в точках крепления согласно (6) равно

$$(w_1)_{x=0,L} = -(\beta M_0 + Q_0)/2\beta^3 D = 26,5 \text{ мкм}. \quad (7)$$

Решение однородного уравнения $w_1(x)$ содержит множитель $e^{-\beta x}$, вследствие чего величина $w_1(x)$ вдоль оси X быстро уменьшается. При $\beta x > 3$ вкладом $w_1(x)$ можно пренебречь. Условие выполняется на расстоянии $x > 2$ мм, поэтому действие момента M_x и силы Q_x учитывается только в точках крепления $x = 0, L$. Согласно моментной теории оболочек одновременно с моментом M_x в оболочке возникает угловой момент M_θ , равный $M_\theta = \mu M_x$ [8, 10]. Действие этого момента будет вызывать вращение строу со свободными концами. Этот эффект проявляется в детекторах с использованием натяжения строу за счет внутреннего давления [6].

ЧАСТНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ СТРОУ

Для равновесного положения строу интерес представляет частное решение $w_2(x)$. Учитывая, что изменение радиуса строу по координате x является плавно меняющейся функцией малой амплитуды, для нахождения частного решения членом $d^4 w/d^4 x$ можно пренебречь. При этих предположениях частное решение уравнения (4) будет иметь вид

$$w_2(x) = \frac{1}{4\beta^4 D} \left(P - \frac{\mu}{2\pi R^2} T_0 \right). \quad (8)$$

Выражение (8) показывает, что $w_2(x)$ постоянно по длине строу и зависит от ее радиуса, свойств материала, натяжения T_0 и перепада давления P . Перепад давления вызывает увеличение диаметра строу, а ее натяжение приводит к уменьшению диаметра. При отсутствии натяжения ($T_0 = 0$) перепад давления P в 1 атм вызывает увеличение радиуса строу за счет $w_2(x) = 26,5$ мкм.

Изменение радиуса можно оценить и исходя из касательного напряжения строу, равного $\sigma_\theta = PR/h$ [12]. Относительная деформация ε в упругой области определяется законом Гука: $\varepsilon = \sigma_\theta/E$. С учетом приведенных соотношений увеличение радиуса под действием давления $P = 1$ атм составит $w_2(x) = \varepsilon R = PR^2/hE = 26,497$ мкм. Значения $(w_1)_{x=0,L}$ и $w_2(x)$ совпадают, откуда следует, что за исключением краевых эффектов радиус строу будет постоянным. Оценка величины изменения радиуса строу разными методами дает хорошее согласие, что подтверждает правильность соотношения (8). Например, натяжение строу силой в 1,2 кг при отсутствии перепада давления ($P = 0$) согласно (8) уменьшает ее диаметр на 7,1 мкм. В вакууме натяжение будет частично компенсировать увеличение диаметра под действием внутреннего давления. Натяжение $T_0 = 2\pi R^2 P/\mu = 4,46$ кг полностью компенсирует изменение диаметра строу под действием перепада давления в 1 атм. В этом случае $w_2(x) = 0$ и изменение диаметра строу будет происходить согласно $w_1(x)$, только на расстоянии 2 мм от точки крепления.

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ НА НАТЯЖЕНИЕ СТРОУ

Влияние внутреннего давления на натяжение строу исследовалось на стенде (рис. 2). По сравнению со стендом, представленным в [15], он включал второй тензодатчик D для измерения суммарной величины касательного напряжения и напряжения силы Q_0 .

Организация стенда. В концы строу вклеивались цилиндрическая часть заглушки C (e_1) и заглушка e_2 . Обратная сторона заглушки C соединялась с датчиком Tm. Заглушка e_2 фиксировалась в планке E, которая имела свободу перемещения по основанию B и жестко соединялась с тензодатчиком D. Перед испытанием строу подвергалась натяжению с силой T_0 , которое задавалось путем перемещения датчика D при фиксированном положении тензодатчика Tm. При этом оба датчика измеряли натяжение.

После установки требуемого натяжения датчик D крепился к основанию. Затем через заглушку e_2 внутрь строу S длиной L подавался под давлением P газ. Тензодатчики Tm и D измеряли результирующую сил натяжения T_0 и вну-

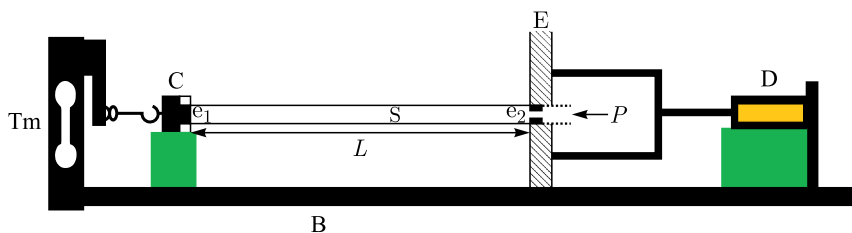


Рис. 2. Стенд для исследования влияния на строу перепада давления

тренного давления, которое включает в себя действие давления на сторону e_1 , касательное воздействие по окружности строу с напряжением σ_θ и действие на концах строу поперечной силы Q_0 . Заглушка e_2 с обеих сторон находится под одинаковым давлением P , поэтому его действие не оказывает влияния на натяжение строу. Элементы соединений имеют малую величину продольной деформации, которая при анализе не учитывалась. Датчик T_m [16] регистрировал только равнодействующую силу растяжения, а датчик D мог измерять и равнодействующую силу сжатия [17]. Для исключения влияния веса заглушки C и датчика D они помещались на подставки, которые обеспечивали соосность центра строу с точкой приложения сил к тензодатчикам.

Оценка влияния давления. Влияние давления оценивалось по изменению показаний тензодатчика T_m . За положительное направление действия сил и вызываемых ими напряжений выбрано направление растяжения датчика T_m , которое вызывается реакцией натянутой строу. Продольное напряжение, вызываемое предварительным натяжением строу, равно $\sigma_{T_0} = T_0/2\pi Rh$. Внутреннее давление действует на сторону e_1 с силой $F_S = P\pi R^2$. Относительно строу эту силу можно описать напряжением σ_S , которое равно $\sigma_S = P\pi R^2/2\pi Rh = PR/2h$. Действие силы F_S и напряжения σ_S направлено на сжатие тензодатчика, поэтому его вклад в результирующее напряжение берется с отрицательным знаком. Касательное напряжение $\sigma_\theta = PR/h$ в продольном направлении вызывает напряжение величиной $\mu\sigma_\theta$, которое согласно (12) направлено на сжатие строу, а датчик T_m подвергается растяжению. Действие поперечной силы Q_0 в продольном направлении сводится к сжатию тензодатчика и вызывает отрицательное напряжение σ_{Q_0} . Сила Q_0 имеет размерность плотности. Для определения ее напряжения силу требуется поделить на толщину стенки строу $\sigma_{Q_0} = P/\beta h$. Поскольку σ_{Q_0} действует ортогонально оси X , в продольном направлении это напряжение вызовет уменьшение результирующего напряжения на величину $\mu\sigma_{Q_0} = \mu P/\beta h$. Результирующее напряжение σ_m , действующее на датчики T_m и D , равно $\sigma_m = F_m/2\pi Rh$, где F_m — равнодействующая сил, приложенных к тензодатчику. Равнодействующая для каждого датчика будет одинаковой, а ее напряжение σ_m , передаваемое строу, составит

$$\sigma_m = \sigma_{T_0} - \sigma_S + \mu\sigma_\theta - \mu\sigma_{Q_0}. \quad (9)$$

Выражая напряжение через действующие силы и умножая на $2\pi Rh$, получим

$$F_m = T_0 - \pi R^2 P + 2\pi R^2 \mu P(1 - 1/R\beta). \quad (10)$$

В выражении (10) все величины, за исключением коэффициента Пуассона, можно измерить, что позволяет определить его значение для материала

готовой строу:

$$\mu = \frac{F_m - T_0 + \pi R^2 P}{2\pi R P (R - 1/\beta)} = \frac{0,5 \left(1 - \frac{\Delta T}{P\pi R^2} \right)}{\left(1 - 0,76 \sqrt{\frac{h}{R}} / \sqrt[4]{1 - \mu^2} \right)}, \quad (11)$$

где $\Delta T = T_0 - F_m$ — величина изменения показаний тензодатчика T_m под действием внутреннего давления. Значение коэффициента Пуассона можно получить либо решением биквадратного уравнения (11), либо методом последовательного приближения. В этом случае значению μ под корнем присваивается значение μ_1 в интервале 0,3–0,4 и по формуле (11) вычисляется величина $\mu = \mu_2$. Если значения не совпадают, $\mu_1 \neq \mu_2$, величину μ_1 корректируют и повторяют следующий шаг итерации. Обычно четыре шага итерации достаточно для получения значения коэффициента Пуассона с точностью $\pm 0,001$. Из соотношения (11) следует, что значение коэффициента Пуассона менее 0,5, что согласуется с теоретическими предсказаниями [18]. Величину изменения показаний тензодатчика ΔT можно измерить экспериментально или, зная значение μ и используя выражение (11), вычислить по формуле

$$\Delta T = \pi R^2 P [1 - 2\mu + 1,52\mu \sqrt{h/R} / \sqrt[4]{1 - \mu^2}]. \quad (12)$$

Из соотношения (12) следует, что строу малого диаметра подвержены меньшему влиянию давления. Например, уменьшение показания тензодатчика для строу с приведенными параметрами при перепаде давления в 1 атм составляет 274 гс/атм, а для трубок диаметром 5 мм уменьшение составит 95 гс/атм. Критическая величина давления P_{cr} , при котором показание тензодатчика равно нулю $F_m = 0$, находится из соотношения (10):

$$P_{cr} = T_0 / \pi R^2 [1 - 2\mu(1 - 1/\beta R)]. \quad (13)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА НАТЯЖЕНИЕ СТРОУ

Влияние давления на натяжение строу с приведенными параметрами было проверено при разных значениях ее натяжения T_0 : 1 — 2220 гс, 2 — 1380 гс, 3 — 927 гс (рис. 3). Стенд с трубкой находился при атмосферном давлении. Внутри трубки с шагом 0,5 атм подавалось давление газа. При каждом значении давления регистрировалось показание тензодатчика T_m . Результаты измерений, отмеченные на рис. 3 кружками, были аппроксимированы линейными зависимостями. Линейная аппроксимация данных повышает точность

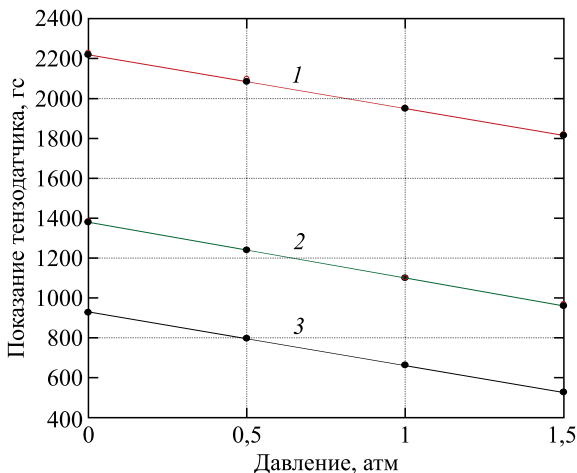


Рис. 3. Показание тензодатчика T_m при действии перепада давления

определения ΔT . Во всех случаях наклон прямых составил 274 гс/тм. Фильтрация данных уменьшила ошибку измерения ΔT на 4%, что позволило более точно определить его величину, необходимую для вычисления коэффициента Пуассона. Ошибка обусловлена релаксацией натяжения строу во времени. Используя полученное значение ΔT , равное 274 гс/атм, методом приближения был определен коэффициент Пуассона. Его значение составило $\mu = 0,338$.

Увеличение перепада давления приводит к уменьшению показаний тензодатчика T_m , что следует из (10) и связано с тем, что сила давления на e_1 превышает силу действия касательного напряжения и поперечной силы. Следует отметить, что для строу сила натяжения, приводящая к деформации, не является аддитивной. Это означает, что при одновременном действии на строу сил в одном направлении ($F_1 \dots F_i$) максимальная деформация будет определяться силой наибольшей величины $F_{\max} = \max(F_1 \dots F_i)$, а не их суммой. В диапазоне значений давления, при которых выполняется условие $\Delta T < T_0$, натяжение T_0 является максимально действующей силой, поэтому длина и натяжение строу с фиксированными концами остаются неизменными. При действии давления сила ΔT будет уменьшать воздействие натянутой строу на тензодатчик T_m , вызывая уменьшение его показаний $F_m = T_0 - \Delta T$. Если сила давления превысит силу натяжения $\Delta T > T_0$, строу будет подвержена растяжению и, как следствие, прогибу. При этом на датчик T_m будет действовать результирующая сила сжатия и он покажет нулевое значение. Данный эффект был проверен экспериментально. При длине строу $L = 1$ м, натяжении $T_0 = 400$ гс и превышении критического давления на 0,25 Н (25 гс) прогиб в центре строу составил порядка 6,5 мм.

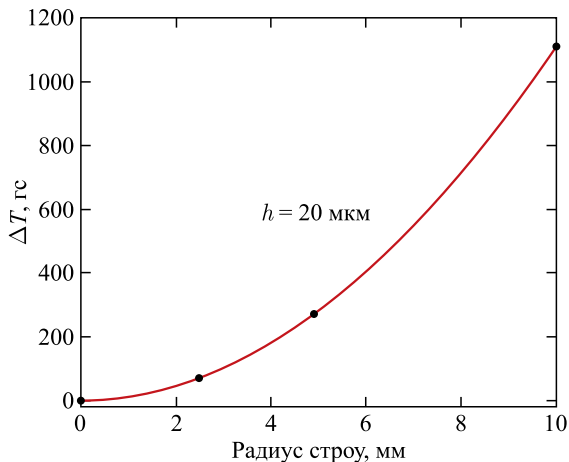


Рис. 4. Зависимость ΔT от радиуса строу

Зависимость ΔT от перепада давления в 1 атм при разных значениях радиуса строу приведена на рис. 4. Испытывались строу одинакового состава радиусом 5, 10 и 20 мм. Толщина стенок строу составляла 20 мкм. Величина ΔT возрастает квадратично с увеличением радиуса, что соответствует зависимости (12). Поэтому использование в эксперименте детекторов с трубками малого диаметра является предпочтительным. Их поведение в вакууме будет оставаться более стабильным.

На рис. 5 приведена зависимость ΔT от толщины стенок строу при перепаде давления в 1 атм. Тестировались строу радиусом 4,9 мм и толщиной

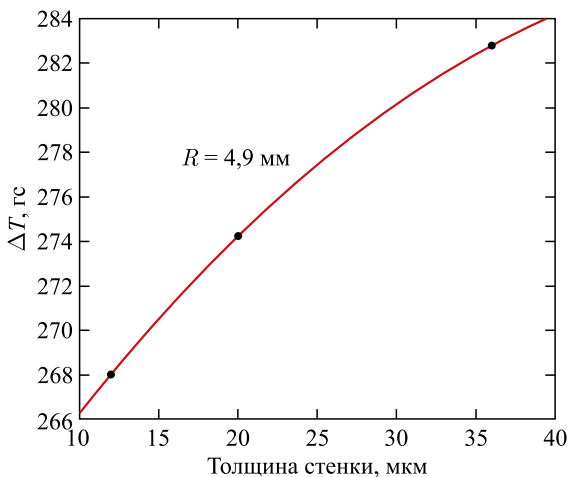


Рис. 5. Зависимость ΔT от толщины стенки строу

стенок 12, 20 и 36 мкм. Толщина стенки оказывает слабое влияние на изменение ΔT . При изменении толщины с 12 до 36 мкм изменение ΔT составило 14,1 гс, что с высокой точностью соответствует зависимости (12). Влияние толщины ограничивается зависимостью от радиуса строу. В выражение (12) она входит в виде отношения $\sqrt{h/R}$, которое является малым параметром. Радиус строу, используемых в детекторах, превышает их толщину более чем в 100 раз.

Поперечная сила Q_0 согласно (10) уменьшает влияние касательного напряжения на величину $1/R\beta \approx 5\%$. Изменение ΔT , зависящее от касательного напряжения σ_θ и силы Q_0 , при заданном перепаде давления можно вычислить по формуле (12) и измерить на стенде. Для этого необходимо компенсировать действие давления на сторону e_1 , которое при перепаде давления в 1 атм составляет $F_P = P\pi R^2 = 754,3$ гс. Компенсация давления достигается путем прикладывания к датчику D силы сжатия строу величиной F_P , которая будет воздействовать и на тензодатчик Tm. При этом датчик Tm будет измерять результирующее натяжение строу $T_{мс}$, включающее T_0 , силу Q_0 и касательное напряжение:

$$T_{мс} = T_0 + 2\pi R^2 \mu P (1 - 1/R\beta). \quad (14)$$

Выражение (14) является следствием (9) при отсутствии перепада давления на заглушках $\sigma_x = 0$. Действие касательного напряжения и поперечной силы направлено ортогонально к оси строу, поэтому, несмотря на меньшую чем T_0 величину, оно влияет на деформацию и натяжение. Увеличение показаний тензодатчика составило значение 482 гс/атм, которое соответствует увеличению натяжения строу. Результаты измерений согласуются с оценкой по формуле (14), которая дает увеличение показаний на 484 гс/атм. Теоретический анализ и экспериментальная проверка указывают на достоверность и отсутствие других механизмов влияния давления на натяжение строу. Условие (14) позволяет оценить натяжение строу T_0 при работе в вакууме. В этом случае перепад давления P в поперечном направлении составляет 1 атм, а при отсутствии перепада давления на заглушках первоначально заданное натяжение T_0 согласно (14) увеличится на 484 гс. Если конструкция газообеспечения строу включает перепад давления на заглушках, натяжение останется неизменным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием теории оболочек выполнен анализ деформации строу под действием сил натяжения и внутреннего давления. Получены аналитические зависимости деформации, которые проверены экспериментально. Показано влияние перепада давления на торцевой стороне заглушки. При его отсутствии натяжение строу увеличивается на 482 гс/атм. Перепад давления

на заглушках в диапазоне $P < P_{cr}$ не влияет на натяжение и деформацию строу. Критическая величина перепада давления P_{cr} зависит от натяжения T_0 , радиуса и толщины строу и свойств ее материала.

Допустимый диапазон перепада внутреннего давления ΔP , в котором натяжение строу остается постоянным, квадратично зависит от ее радиуса. Поэтому использование в детекторах строу малого диаметра является предпочтительным. Толщина стенок строу не оказывает заметного влияния на изменение натяжения ΔT . Троекратное увеличение толщины строу диаметром 9,8 мм привело к изменению ΔT всего на 14,1 гс.

Отмечен недостаток технологии натяжения строу за счет внутреннего давления, которое вызывает их вращение. Вращение строу приводит к их деформации и уменьшению срока работы в эксперименте. Склеивание строу в массив увеличивает количество вещества на пути пучка, которое ухудшает координатное разрешение.

Предложена новая методика определения коэффициента Пуассона материала готовой строу, и измерена его величина. Для трубок толщиной 20 мкм, используемых для создания строу детектора для эксперимента COMET, его значение равно $\mu = 0,338$.

Результаты работы имеют важное значение для понимания поведения детекторов на базе сварных строу в вакууме, выбора их параметров и технологии создания.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пешихонов В. Д.* Координатные детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок // ЭЧАЯ. 2015. Т. 46, № 1. С. 167–212.
2. *Азорский Н. И. и др.* Устройство для изготовления цилиндрических трубок для газонаполненных дрейфовых детекторов ионизирующего излучения. Патент РФ № 2555693. 2014 // Изобретения. Полезные модели. 2015. № 19.
3. *Hahn F. et al.* NA62 Technical Design Document. CERN, NA62-10-07. 2010.
4. *Kuno Y. et al.* Experimental Proposal for Phase-1 of the COMET Experiment at J-PARC. KEK/JPARC-PAC 2012-10.
5. *Anelli M., Aoki S., Arduni G. et al.* A Facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS. CERN-SPSC-2015-016, SPSC-P-350. 2015; arXiv:1504.04956 [physics. ins-det].
6. *Wintz P.* A Large Tracking Detector in Vacuum Consisting of Self-Supporting Straw Tubes // AIP Conf. Proc. 2004. V. 698. P. 789–792.
7. *Gianotti P. et al.* The Straw Tube Trackers of the PANDA Experiment; <http://inspirehep.net>. 2013.
8. *Самуль В. И.* Основы теории упругости и пластичности. М.: Высш. шк., 1982.
9. *Ward I. M., Sweeney J.* An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers. John Wiley & Sons, Ltd., 2004.

10. *Calladine C. R.* Theory of Shell Structures. Cambridge Univ. Press, 1983.
11. *Jones R. M.* Deformation Theory of Plasticity. Bull Ridge Publ., 2009. P. 53–77.
12. *Бургер И. А., Мавлютов Р. Р.* Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1986. С. 533–539.
13. ГОСТ 9550-81. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе.
14. *Timoshenko S.* Theory of Plate and Shells. McGraw-Hill Book Co, 1959. P. 514–530.
15. *Glonti L., Enik T., Kekelidze V., Rolesnikov A., Madigozhin D., Molokanova N., Movchan S., Potrebenikov Yu., Shkarovskiy S.* JINR Preprint E1-2017-20. Dubna, 2017.
16. Электронный безмен Zumman 1801.
17. Strain gauge FGP-2, NIDEC-SHIMPO Instr.
18. *Mott C. H., Roland C. M.* Limits to Poisson's Ratio in Isotropic Materials — General Results for Arbitrary Deformation. Chemistry Division, Naval Res. Lab., Code 6120. Washington DC 20375-5342.

Получено 26 декабря 2017 г.

Редактор *Е. В. Григорьева*

Подписано в печать 31.01.2018.

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

Усл. печ. л. 0,94. Уч.-изд. л. 0,98. Тираж 215 экз. Заказ № 59324.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/