

## Влияние внутреннего давления на натяжение в сварных строу трекового детектора

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

*Представлены теоретический анализ и результаты проверки влияния внутреннего давления на натяжение сварных тонкостенных трубок из майлара (т. н. 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 препятствует её ползучести, что увеличивает срок службы строу. Наличие перепада давления вносит 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 давления на натяжение сварных строу. Для трубок детектора СОМЕТ его значение равно 0,338.*

*Ключевые слова:* сварные строу, модель равновесного состояния строу, влияние внутреннего давления, коэффициент Пуассона.

### Введение

В технике физического эксперимента широкое применение нашли детекторы на основе тонкостенных трубок из пленки майлара – строу (от англ. straw – солома). 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 предварительно 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 применение при создании координатных детекторов [3–5]. Тем не менее, использование строу в условиях перепада внутреннего давления выявило наличие проблем, например, в виде его влияния на натяжение строу. Автор работы [6] столкнулся с проблемой вращения строу под действием внутреннего давления, причина которого так и осталась не выясненной. Такое вращение строу стали блокировать путем их склеивания в общий массив [7]. Но проблема влияния внутреннего давления на функциональные характеристики строу осталась и потребовала специального изучения.

Целью данной работы являлся анализ влияния давления на строу, проведенный в рамках теории

Волков Александр Дмитриевич, научный сотрудник.  
Евтухович Петр Григорьевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.  
Моисеенко Анатолий Сергеевич, научный сотрудник.  
Сабиров Басар Мухитдинович, научный сотрудник.  
Цамалаидзе Звиад, начальник сектора, к.ф.-м.н.  
Цверава Николози, младший научный сотрудник.  
Объединенный институт ядерных исследований.  
Россия, 141980, Московская обл., Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6.  
E-mail: adv@jinr.ru

Статья поступила в редакцию 24 января 2018 г.

деформации оболочек [8–11], и экспериментальная проверка полученных теоретических 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 показана система 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  $M_\theta$ . Силы  $N_x$  и  $N_\theta$  характеризуют их суммарное воздействие в поперечном сечении оболочки. При рассмотрении поведения оболочки под воздействием внешних сил результирующие силы  $N_x$ ,  $N_\theta$  и моменты  $M_x$ ,  $M_\theta$  прикладываются к её срединному слою. Значения

сил определяются соотношениями:  $N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz$

и  $N_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta dz$ , где напряженности  $\sigma_x$  и  $\sigma_\theta$  дей-

ствуют в направлении осей  $X$  и  $\theta$  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 образца следует, что силы и моменты на его концах действуют 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 линейный удельный вес строу составляет (0,4–1,2) гс/м.

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

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

Здесь  $w$  – величина деформации срединного слоя строу, равная изменению её радиуса под действием сил;  $\beta$  – характерный параметр строу;  $D$  – ци-

линдрическая жесткость строу на изгиб;  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала строу, характеризующий относительную деформацию строу 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  $X$  строу;  $R$  – внутренний радиус строу;  $E$  – модуль упругости материала строу;  $h$  – толщина стенки строу. Цилиндрическая жесткость  $D$  и параметр  $\beta$  выражаются соотношениями:

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

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

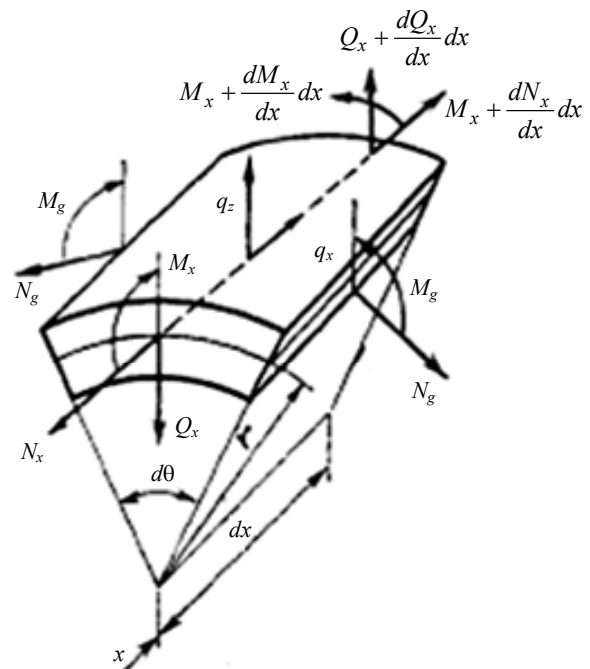


Рис. 1. Действующие силы и моменты в цилиндрической оболочке.

В нашей работе основное внимание было уделено исследованию сверхтонких строу с параметрами:  $h = 20$  мкм,  $R = 4,9$  мм; модуль упругости  $E = 4,44 \times 10^9$  Н/м<sup>2</sup> 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  $\beta^4$  составляют:  $D = 3,3392 \times 10^{-6}$  (Н м),  $\beta^4 = 2,767 \times 10^{14}$  м<sup>-4</sup>. Заметим, что 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  $N_x$ , вызываемая 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 её 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

Общее решение неоднородного уравнения (4) включает решение однородного уравнения  $w_1(x)$  и частное решение уравнения  $w_2(x)$ . Решение однородного уравнения (5) приведено в работе [14]:

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

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

Здесь 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 значение  $M_x$  и  $Q_x$  достигает максимальной величины  $M_0 = P / 2\beta^2$ ,  $Q_0 = -P / \beta$ . Для строу с указанными параметрами изменение радиуса в точках крепления, согласно формуле (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  $M_\theta$ , равный:  $M_\theta = \mu M_x$  [8, 10]. Действие этого момента будет вызывать вращение строу со свободными концами. Именно этот вышеуказанный эффект [6] и проявляется в детекторах с использованием натяжения строу за счет внутреннего давления.

### 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 изменяющейся 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 следующий 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 её радиуса, свойств материала, натяжения  $T_0$  и перепада давления  $P$ . Перепад давления вызывает увеличение диаметра строу, а её натяжение приводит к уменьшению диаметра. При отсутствии натяжения ( $T_0 = 0$ ) перепад давления  $P$  в 1 атм. вызывает увеличение радиуса за счет  $w_2(x)$  на 26,5 мкм. Изменение радиуса можно оценить и исходя из касательного напряжения строу, равного  $\sigma_\theta = PR / h$  [12]. Относительная деформация  $\varepsilon$  в упругой области определяется законом Гука:  $\varepsilon = \sigma_\theta / E$ . С учетом приведенных соотношений увеличение радиуса под действием перепада давления в одну атмосферу составит:  $w_2(x) = \varepsilon R = PR^2 / hE = 26,497$  мкм.

Значения  $(w_1)_{x=0,L}$  и  $w_2(x)$  совпадают. Это указывает, что, за исключением краевых эффектов, радиус строу остается постоянным.

Оценка величины изменения радиуса строу разными методами дает хорошее согласие, что подтверждает достоверность соотношения (8). Например, натяжение строу силой в 1,2 кгс при отсутствии перепада давления ( $P = 0$ ), согласно (8), уменьшает её диаметр на 7,1 мкм. В вакууме натяжение будет частично компенсировать увеличение диаметра под действием внутреннего давления. Натяжение  $T_0 = 2\pi R^2 P / \mu = 4,46$  кгс 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.

### Экспериментальное исследование влияния внутреннего давления на натяжение строу

Влияние внутреннего давления на натяжение строу исследовалось на стенде, схема которого показана на рис. 2. По сравнению со стендом,

представленным в работе [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  $C$  ( $e1$ ) и заглушка  $e2$ . Обратная

сторона заглушки  $C$  соединялась с датчиком  $T_m$ . Заглушка  $e2$  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  $T_m$ . При этом оба датчика измеряли натяжение строу.

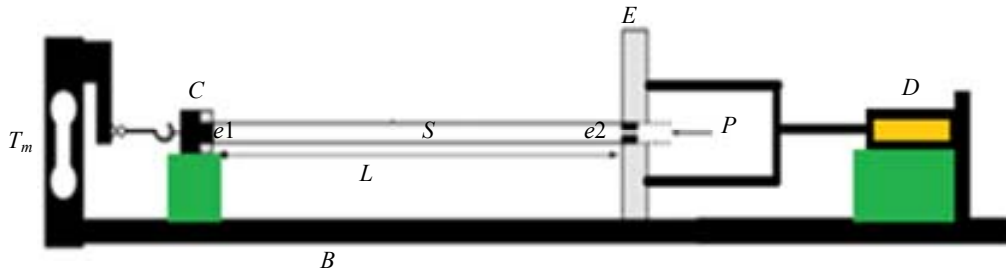


Рис. 2. Стенд для исследования влияния на строу перепада давления.

После установки требуемого натяжения датчик  $D$  крепился к основанию. Затем через заглушку  $e2$  внутрь строу  $S$  длиной  $L$  подавался под давлением  $P$  газ. Тензодатчики  $T_m$  и  $D$  измеряли результирующую силу натяжения  $T_0$  и внутреннего давления, которое включает в себя действие давления на сторону  $e1$ , касательное воздействие по окружности строу с напряжением  $\sigma_\theta$  и действие на концах строу поперечной силы  $Q_0$ . Заглушка  $e2$  с обеих сторон находится под одинаковым давлением  $P$ , поэтому давление на заглушку 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  $\sigma_{T_0} = T_0 / 2\pi R h$ . Внутреннее давление действует на сторону  $e1$  с силой  $F_S = P\pi R^2$ . Эту силу можно описать напряжением:  $\sigma_S = P\pi R^2 / 2\pi R h = PR / 2h$ .

Сила  $F_S$  оказывает сжимающее действие на тензодатчик, поэтому её вклад в результирующее напряжение берется с отрицательным знаком. Касательное напряжение  $\sigma_\theta = PR / h$  в продольном направлении вызывает напряжение величиной  $\mu\sigma_\theta$  [12], которое направлено на сжатие строу, а датчик  $T_m$  подвергается растяжению. Действие поперечной силы  $Q_0$  в продольном направлении сводится к сжатию тензодатчика, что вызывает отрицательное напряжение  $\sigma_{Q_0}$ . Сила  $Q_0$  имеет размерность плотности. Для определения её напряжения, силу требуется поделить на толщину стенки строу  $\sigma_{Q_0} = P / \beta h$ . Поскольку  $\sigma_{Q_0}$  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  $\sigma_m$ , действующее на датчики  $T_m$  и  $D$ , равно  $\sigma_m = F_m / 2\pi R h$ , где  $F_m$  – равнодействующая сил, приложенных к тензодатчику. Равнодействующая для каждого датчика будет одинаковой, а её напряжение  $\sigma_m$ , передаваемое строу, составит величину:

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

Определяя напряжения через действующие силы и умножая на  $2\pi R h$ , получим выражение:

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

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 изменений показания тензодатчика  $T_m$  под действием внутреннего давления. Значение коэффициента Пуассона можно получить, либо решая биквадратное уравнение (11), либо методом последовательного приближения. В последнем случае значению  $\mu$  под корнем присваивается величина  $\mu_1$  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  $\mu_1$  корректируют, и повторяют следующий шаг итерации. Обычно четыре шага итерации достаточно для получения значения коэффициента Пуассона с точностью  $\pm 0,001$ . Из соотношения (11) сразу следует, что значение коэффициента Пуассона менее 0,5, что согласуется с теоретическими предсказаниями [18].

Величину изменения показаний тензодатчика  $\Delta T$  можно измерить экспериментально или, зная значение  $\mu$  и используя выражение (11), вычислить по формуле:

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

Из соотношения (12) можно заключить, что строу малого диаметра подвержены меньшему влиянию давления. Например, уменьшение показания тензодатчика для строу с приведенными параметрами при перепаде давления 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):

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

### Экспериментальная проверка влияния давления

Влияние давления на натяжение строу с приведенными параметрами было проверено при разных значениях её начального натяжения  $T_0$ , а именно: 1 – 2220 гс, 2 – 1380 гс, 3 – 927 гс. 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 на рис. 3 отмечены кружками и были аппроксимированы линейными зависимо-

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

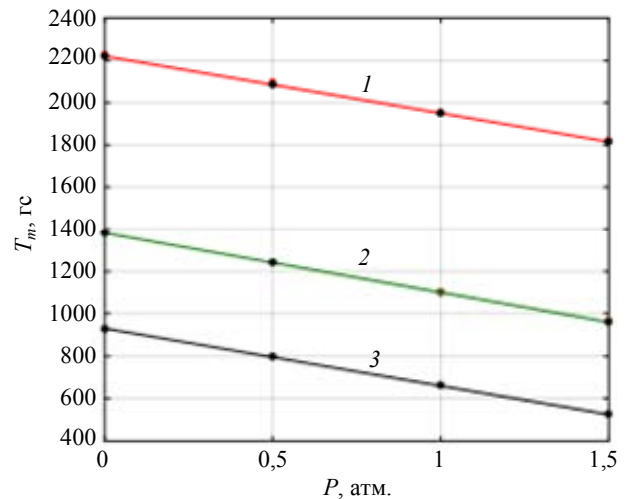


Рис. 3. Показание тензодатчика  $T_m$  при действии перепада давления  $P$ .

Увеличение перепада давления приводит к уменьшению показаний тензодатчика  $T_m$ , что следует из (10), и связано с тем, что сила давления на  $e1$  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 давлений, при которых выполняется условие  $\Delta T < T_0$ , натяжение  $T_0$  является максимально действующей силой, поэтому для строу с фиксированными концами длина и натяжение остаются неизменными. При действии давления сила  $\Delta T$  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 2,5 Н (250 гс) прогиб в центре строу составил порядка 6,5 мм.

Зависимость  $\Delta T$  от перепада давления в 1 атм. при различных значениях радиуса строу приведена на рис. 4. Испытывались строу одинакового состава, но с радиусом 2,5; 5 и 10 мм. Толщина стенок строу составляла 20 мкм. Величина  $\Delta T$  возрастает квадратично с увеличением радиуса, что соответствует зависимости (12). Поэтому использование в эксперименте строу-детекторов с трубками малого диаметра является предпочтительным. Их поведение в вакууме будет оставаться более стабильным.

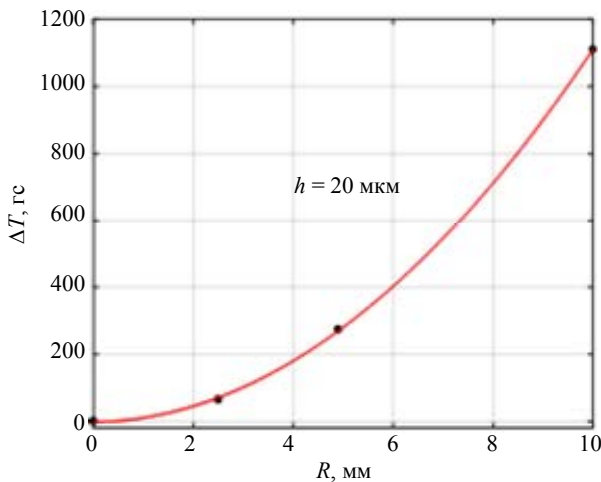


Рис. 4. Зависимость  $\Delta T$  от радиуса строу.

На рис. 5 приведена зависимость  $\Delta T$  от толщины стенок при перепаде давления в 1 атм. Тестировались строу радиусом 4,9 мм и толщиной стенок 12; 20 и 36 мкм. Толщина стенки оказывает слабое влияние на изменение  $\Delta T$ . При изменении толщины с 12 мкм до 36 мкм изменение  $\Delta T$  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  $1/R\beta \approx 0,05$ . Изменение  $\Delta T$ , зависящее от касательного напряжения  $\sigma_\theta$  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 одну атмосферу 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  $T_m$ . При этом

датчик  $T_m$  будет измерять результирующее натяжение строу  $T_{mc}$ , включающее  $T_0$ , действие силы  $Q_0$  и касательного напряжения:

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

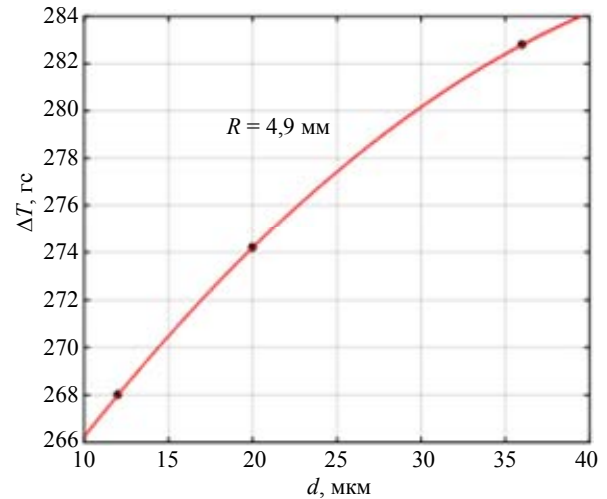


Рис. 5. Зависимость  $\Delta T$  от толщины  $h$  стенки строу.

Выражение (14) является следствием соотношения (9) при отсутствии перепада давления на заглушках  $\sigma_S = 0$ . Действие касательного напряжения и поперечной силы направлено ортогонально к оси строу, и, несмотря на меньшую, чем  $T_0$  величину, оно влияет на её деформацию и натяжение. Увеличение натяжения  $T_0$  составило 482 гс/атм, которое соответствует увеличению натяжения строу. Результаты измерений согласуются с оценкой по формуле (14), которая дает увеличение показаний на 484 гс/атм.

Приведенный анализ и его 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, то натяжение останется неизменным.

## Заключение

В работе 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 торцевых сторонах заглушек. При его отсутствии натяжение строу

увеличивается на 482 г/атм. Перепад давления на заглушках в диапазоне  $P < P_{cr}$  не влияет на натяжение строу. Критическая величина перепада давления  $P_{cr}$  зависит от натяжения  $T_0$ , радиуса и толщины строу и свойств её материала.

Допустимый диапазон перепада внутреннего давления  $\Delta P$ , в котором натяжение строу остается постоянным, квадратично зависит от её радиуса. Поэтому использование в детекторах строу малого диаметра является предпочтительным. Толщина стенок строу не оказывает заметного влияния на изменение натяжения  $\Delta T$ . Троекратное увеличение толщины строу диаметром 9,8 мм привело к изменению  $\Delta T$  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 эксперимента СОМЕТ, его значение составило  $\mu = 0,338$ .

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В. Д. // Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ). 2015. Т. 46. № 1. С. 167.

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. 10.07.2015.

3. Hahn F. et al. NA62 Technical Design Document. CERN, NA62 – 10 – 07, December 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., Arduini G. et al. A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS. CERN-SPSC-2015-016, SPSC-P-350, 8 April 2015 (arXiv: 1504.04956 [physics. ins-det]).

6. Wintz P. A Large Tracking Detector in Vacuum Consisting of Self-supporting Straw Tubes. In AIP Conf. Proc. 698, p. 789–792, 2004.

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.: Высшая школа, 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 University Press, 1983.

11. Jones R. M. Deformation theory of plasticity. Bull Ridge Publishing, 2009. .

12. Бургер И. А., Мавлютов П. П. Сопrotивление материалов - Наука. 1986.

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.

15. Glonti L., Enik T., Kekelidze V., Rolesnikov A., Madigozhin D., Molokanova N., Movchan S., Potrebenikov Yu., Shkarovskiy S. / Препринт ОИЯИ Е1 – 2017 – 20, 2017.

16. Электронный безмен Zumman 1801. [www.mvideo.ru](http://www.mvideo.ru)

17. Strain gauge FGP-2, NIDEC-SHIMPO Instr., [www.hans-schmidt.com](http://www.hans-schmidt.com)

18. Mott C. H., Roland C. M. Limits to Poisson's ratio in isotropic materials – general results for arbitrary deformation. Chemistry Division, Naval Research Laboratory, Code 6120, Washington DC 20375 – 5342.

PACS: 29.40 Cs, 29.40 Gx.

## Influence of internal pressure on stress of welded straws of track detectors

A. D. Volkov, P. G. Evtoukhovich, A. S. Moiseenko, B. M. Sabirov,  
Z. Tsamalaidze, and N. Tsverava

Joint Institute for Nuclear Research  
6 Joliot-Curie str., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia  
E-mail: [adv@jinr.ru](mailto:adv@jinr.ru)

Received January 24, 2018

*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 exerts 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 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.***

***Keywords:*** welded straw, model of straw equilibrium state, influence of internal pressure, Poisson's ratio.

#### REFERENCES

1. V. D. Peshekhonov, PEPAN T. **46** (1), 167 (2015).
2. N. I. Azorskii et al., Patent RF № 2555693, 2014. Inventions. Useful models. 2015, No. 19, 10.07.2015.
3. F. Hahn et al. *NA62 Technical Design Document*. CERN, NA62 – 10 – 07, December 2010.
4. Y. Kuno et al., *Experimental Proposal for Phase-1 of the COMET Experiment at J – PARC*. (KEK/JPARC – PAC 2012 – 10).
5. M. Anelli, S. Aoki, G. Arduni et al., *A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS*. CERN-SPSC-2015-016, SPSC-P-350, 8 April 2015 (arXiv: 1504.04956 [physics.ins-det]).
6. P. Wintz, in *AIP Conf. Proc.* 698, 2004, p. 789-792.
7. P. Gianotti et al., *The Straw Tube Trackers of the PANDA Experiment*. <http://inspirehep.net>, 2013.
8. V. I. Samul. *Bases of the theory of elasticity and plasticity*. (High school, 1982), [in Russian].
9. I. M. Ward and J. Sweeney, *An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers*. (John Wiley & Sons, Ltd., 2004).
10. C. R. Calladine, *Theory of Shell Structures*. (Cambridge University Press, 1983).
11. R. M. Jones, *Deformation Theory of Plasticity* (Bull Ridge Publishing, 2009).
12. I. A. Birger and R. R. Mavljutov, *Strength of Materials* (Nauka, 1986) [in Russian].
13. GOST RF 9550-81. *Plastics. Methods for determining the elasticity modulus in tension, compression and bending*.
14. S. Timoshenko, *Theory of Plate and Shells*. (McGraw-Hill Book Co, 1959).
15. L. Glonti, T. Enik, V. Kekelidze, A. Rolesnikov, D. Madigozhin, N. Molokanova, S. Movchan, Yu. Potrebenikov, and S. Shkarovskiy, Preprint JINR, E1 – 2017 – 20, (2017).
16. *Electronic steelyard Zumman 1801*, [www.mvideo.ru](http://www.mvideo.ru)
17. NIDEC-SHIMPO Instr., *Force Gauge FGP for compression and tension force* ([www.hans-schmidt.com](http://www.hans-schmidt.com))
18. C. H. Mott and C. M. Roland, *Limits to Poisson's ratio in isotropic materials – general results for arbitrary deformation*. (Chemistry Division, Naval Research Laboratory, Code 6120, Washington DC 20375 – 5342).