

На правах рукописи

Самакалев Степан Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ТРУБЧАТЫХ
ПРУЖИН С ПЕРЕМЕННЫМ ПО ДЛИНЕ СЕЧЕНИЕМ**

**05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Тюмень – 2006

Работа выполнена на кафедре общетехнических дисциплин Тюменской государственной сельскохозяйственной академии.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Пирогов Сергей Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Сысоев Юрий Георгиевич;
кандидат физико-математических наук,
доцент
Баринов Василий Александрович

Ведущая организация: Томский манометровый завод
ОАО «Манотомь», г. Томск

Защита состоится «___» февраля 2007 года в ____ часов на заседании диссертационного совета К 212.274.01 при Тюменском государственном университете по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд.217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан «___» января 2007 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Бутакова Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Самое широкое распространение во всех отраслях промышленности для измерения избыточного и вакуумметрического давления, разности давлений, расхода и температуры имеют деформационные манометрические приборы, чувствительным элементом которых является манометрическая трубчатая пружина, мембрана или сильфон. При этом такие характеристики приборов, как порог чувствительности, верхний и нижний пределы измерения, надежность определяются свойствами упругого чувствительного элемента.

Сравнительно с другими чувствительными элементами манометрические трубчатые пружины обладают следующими преимуществами. Приборы, использующие манометрическую пружину, позволяют преобразовать входной сигнал (давление жидкой или газообразной среды) в выходной (поворот показывающей стрелки или тяговое усилие, развиваемое пружиной) без применения емкостных, индуктивных или тензометрических датчиков. Это дает возможность упростить конструкцию прибора и повысить его надежность.

Кроме того, манометрические пружины обладают выгодным сочетанием характеристик: при достаточно больших перемещениях свободного конца имеют высокую прочность, обладают высокой жесткостью к действию внешних сил, имеют линейную характеристику, обеспечивают высокую точность показаний во всем диапазоне измерения давления или температуры.

Применяемые в настоящее время конструкции манометрических пружин имеют поперечное сечение, геометрические параметры которого не изменяются вдоль пружины. Однако можно указать условия работы, в которых для таких конструкций технические характеристики будут снижены. Например, при работе пружины в кинематическом режиме под действием сосредоточенной силы или при работе пружины в режиме силовой компенсации ее напряженно-деформированное состояние изменяется вдоль продольной оси. Это отрицательно отражается на технических характеристиках: снижается жесткость к действию внешних сил, уменьшается величина тяговых усилий пружины, снижается ее прочность.

Для того чтобы улучшить технические характеристики, в последнее время предложены конструкции пружины с переменным вдоль продольной оси поперечным сечением. При этом переменными могут быть как размеры, так и форма сечения. Выполнение пружины с изменяющимися геометрическими параметрами сечения позволяет выровнять напряженно-деформированное состояние вдоль пружины и улучшить ее характеристики.

Несмотря на свои преимущества в сравнении с пружинами постоянного сечения, в настоящее время пружины с переменным сечением не выпускаются. Основной причиной, сдерживающей внедрение конструкций пружин с переменным сечением, является отсутствие метода их расчета.

Цель диссертационной работы заключается в разработке метода расчета пружин с переменным по длине поперечным сечением. При этом, учитывая множество геометрических параметров, определяющих конкретную конструк-

цию пружины переменного сечения, была поставлена только прямая задача расчета: определение основных технических характеристик пружин по известным геометрическим параметрам, свойствам материала пружин и величине внешней нагрузки.

Объектом исследования является манометрическая трубчатая пружина (пружина Бурдона), применяемая в качестве чувствительного элемента в манометрических и термометрических приборах.

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние манометрической пружины с переменным по длине сечением.

При разработке метода расчета пружин с переменным сечением в работе были поставлены и решены следующие задачи:

1. Изучение особенностей, преимуществ и недостатков существующих решений задачи расчета манометрических пружин с постоянным сечением, а также обзор решений для тонкостенных трубок с учетом реальных условий на краях.
2. Проведение оценки влияния деформаций смежных сечений для пружины с изменяющимися вдоль продольной оси геометрическими параметрами.
3. Разработка модели поперечного сечения, позволяющей наиболее точно задать форму сечения при изменении его геометрических параметров в широком диапазоне.
4. Вывод формул для расчета технических характеристик пружин с переменным по длине сечением.
5. Исследование влияния изменения геометрических параметров сечений вдоль пружины на ее технические характеристики.
6. Разработка алгоритма и комплекса прикладных программ для расчета пружины переменного сечения с заданной погрешностью.
7. Экспериментальное исследование деформаций и напряжений пружины переменного сечения и оценка достоверности полученных теоретических результатов решения.

Методологической базой для исследования послужили работы Андреевой Л.Е., Аксельрада Э.Л., Васильева Б.Н., Тыжнова Г.И. и Пирогова С.П.

Методы исследования. В работе использованы методы теории оболочек, численные методы, при решении систем дифференциальных уравнений использован метод гармонического баланса. При постановке численных экспериментов и при исследовании влияния геометрии манометрической пружины на ее технические характеристики была применена система компьютерной математики MATLAB, на языке программирования этой же системы создан пакет прикладных программ для расчета пружин с постоянным и переменным сечением.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан метод расчета пружин с переменным сечением, при этом показано, что принятая математическая модель описывает реальную конструкцию достаточно точно.
2. Доказано, что манометрические пружины с переменным сечением в режиме силовой компенсации обладают лучшими техническими характери-

стиками в сравнении с традиционно используемыми пружинами постоянного сечения.

3. Разработан обобщенный алгоритм расчета пружин переменного сечения с заданной погрешностью.
4. Предложена схема «сечение из элементов постоянной кривизны» для задания формы манометрических пружин с постоянным сечением, при применении к их расчету метода, разработанного в работах Э.Л. Аксельрада и Б.Н. Васильева.
5. В результате анализа напряженно-деформированного состояния пружины в разных режимах работы предложены и защищены авторскими свидетельствами новые конструкции манометрических пружин.

Достоверность результатов работы подтверждается результатами численных экспериментов, а также экспериментальными исследованиями напряжений и деформаций, проведенными на нескольких образцах манометрических пружин разных типов с переменным по длине сечением.

Практическая ценность работы.

1. Разработанный метод расчета и созданный пакет прикладных программ дает возможность определения технических характеристик у пружин с переменным по длине сечением и тем самым позволяет такие конструкции пружин внедрить в производство.
2. Предложенная схема «сечение из элементов постоянной кривизны», в сравнении с известными схемами, позволяет более точно задать форму наиболее распространенных типов поперечных сечений манометрической пружины.
3. Разработаны рекомендации по рациональному проектированию пружин с переменным по длине сечением.

Созданный комплекс прикладных программ для расчета манометрических трубчатых пружин постоянного и переменного сечения внедрен на Томском манометровом заводе (ОАО «Манотомь»).

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференции «Актуальные вопросы в АПК» (г. Тюмень, 2002), на международной научно-практической конференции «Проблемы эксплуатации транспортных систем в суровых условиях» (г. Тюмень, 2002), на международном научно-практическом семинаре «Транспортный комплекс - 2002» (г. Тюмень, 2002) на конференции «Новый взгляд на проблемы АПК» (г. Тюмень, 2003), на научном семинаре кафедр факультета математики и компьютерных наук Тюменского государственного университета (2003), на расширенном заседании кафедры общетехнических дисциплин ТюмГСХА (2006). По теме диссертации опубликовано семь статей. Получено четыре патента на изобретения и свидетельство об официальной регистрации программы ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы из 105 наименований и приложений. Общий объем работы составляет 168 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследования и изложено краткое содержание работы.

В первой главе рассмотрен принцип действия манометрической пружины, дан обзор конструкций пружины, широко распространенных на практике. В результате рассмотрения работы пружины в кинематическом режиме и режиме силовой компенсации дан сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния пружин постоянного и переменного сечения. Это позволило сформулировать цель работы и поставить основные задачи исследования.

Также в первой главе проведен обзор решений задачи расчета для пружины постоянного сечения. В результате установлено, что широко известный энергетический метод расчета имеет ряд недостатков, связанных с положенными в его основу предположениями о характере деформации поперечного сечения пружины. Наиболее предпочтительным следует считать метод расчета, разработанный на основе полубезмоментной теории гибких оболочек и предложенный в работах Э.Л. Аксельрада и Б.Н. Васильева, вследствие его высокой точности и быстрой сходимости решения.

Кроме того, в первой главе показано, что существующие решения задачи изгиба даже для тонкостенной трубки постоянного сечения с учетом реальных краевых условий имеют приближенный характер и получены при многочисленных предположениях. Решение задачи для существующей в литературе модели напряженно-деформированного состояния тонкостенной трубки с переменным по длине сечением, пригодное для практических расчетов, затруднено и до настоящего времени не получено.

Во второй главе рассмотрена модель напряженно-деформированного состояния манометрической пружины с переменным по длине сечением и предложено решение задачи изгиба такой пружины. Предложенная модель построена на основе линейной теории тонкостенных оболочек. Также во второй главе проведено исследование технических характеристик манометрических трубок трех типов.

В первом параграфе показано, что для реальных конструкций пружин с переменным сечением геометрические параметры вдоль продольной оси изменяются медленно. Это позволило предположить, что для трубок переменного сечения можно применить допущение, используемое при расчете трубок с постоянным сечением: взаимным влиянием деформаций поперечных сечений можно пренебречь.

Для обоснования указанного предположения в качестве расчетной схемы манометрической пружины с переменным сечением принята тонкостенная оболочка, у которой продольная ось является дугой окружности. На поверхности оболочки введена система криволинейных координат: ξ - изменяется вдоль оболочки, η - изменяется в окружном направлении; и показано, что систему координат можно приближенно считать ортогональной и главной. Поперечное сечение оболочки изменяется от окружности радиуса r_0 при $\xi = 0$ до эллипса с

полуосями $a = r_0 + \delta L$, $b = r_0 - \delta L$ при $\xi = L$, где L - длина продольной оси оболочки (см. рис.1).

Для реальных конструкций манометрических пружин проведена оценка величины коэффициента δ , в результате чего установлено $\delta \sim 1/50$.

Принимая обычные для теории оболочек гипотезы, а также вводя допущение

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{F}{R_1} \right) \approx \frac{1}{R_1} \left(\frac{\partial F}{\partial \xi} \right),$$

(где F – любая функция, характеризующая напряженно-деформированное состояние оболочки) показано, что в выражениях для относительных деформаций срединной поверхности слагаемые, содержащие множитель $\frac{1}{A_2} \cdot \frac{\partial A_2}{\partial \xi}$ (где A_2 - коэффициент Ляме по координате η), имеют порядок δ в сравнении с остальными, вследствие чего ими можно пренебречь. Подставляя, с учетом этого, вы-

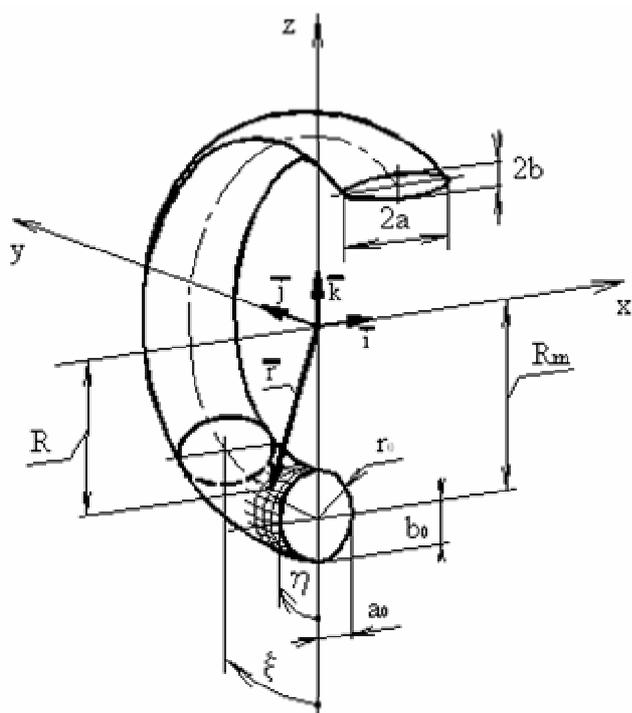


Рис.1. Расчетная схема манометрической трубки переменного сечения

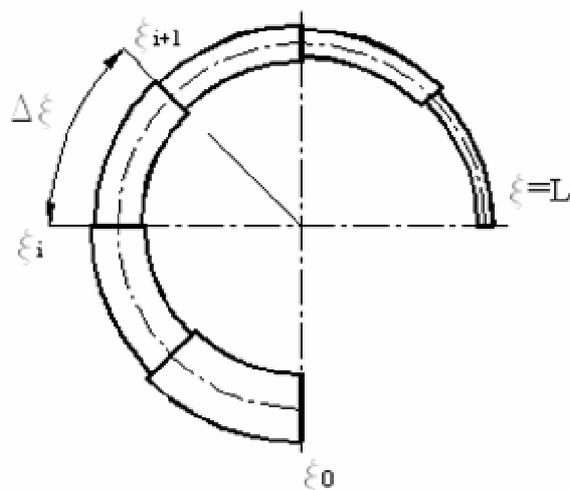


Рис.2. Разбиение трубки на части с постоянным сечением

ражения для деформаций ε_1 , ε_2 , ω и т.д., в выражение потенциальной энергии деформации оболочки:

$$T = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \int_0^L \int_0^{2\pi} \left[(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2 - 2(1-\nu) \left(\varepsilon_1 \varepsilon_2 - \frac{\omega^2}{4} \right) \right] A_2 d\eta d\xi +$$

$$+ \frac{Eh^3}{24(1-\nu^2)} \int_0^L \int_0^{2\pi} \left[(\kappa_1 + \kappa_2)^2 - 2(1-\nu) (\kappa_1 \kappa_2 - \tau^2) \right] A_2 d\eta d\xi$$

может быть получен квадратичный функционал, коэффициенты которого $f_k(\xi, \eta)$ зависят от координаты ξ через выражения относительных деформаций

срединной поверхности, которые имеют тот же вид, что и выражения для относительных деформаций, применяемые при расчете трубки постоянного сечения.

В результате разбиения отрезка $\xi = [0; L]$ на n равных частей и аппроксимации коэффициентов $f_k(\xi, \eta)$ функциями $f_k(\xi_i, \eta)$, постоянными по ξ на каждом участке $\Delta\xi = \xi_{i+1} - \xi_i$, определена погрешность аппроксимации:

$$\Delta f_k \leq D \cdot \Delta\xi, \quad D = \max_{\xi, \eta} \left| \frac{\partial f_k}{\partial \xi} \right|.$$

При замене коэффициентов $f_k(\xi, \eta)$ на каждом участке $\Delta\xi$ функциями $f_k(\xi_i, \eta)$, выражения для деформаций срединной поверхности $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \omega$ и т.д. полностью совпадают с выражениями для деформаций, которые используются при расчете трубки с постоянным сечением. Это позволило заключить, что аппроксимация коэффициентов $f_k(\xi, \eta)$ на участках $\Delta\xi$ постоянными по ξ функциями эквивалентна замене на каждом участке трубки переменного сечения трубкой с постоянным сечением (см. рис.2).

Для оценки влияния погрешностей Δf_k на погрешность определения перемещений u, v, w срединной поверхности трубки использовано выражение, известное из литературы по исследованию деформаций тонкостенных оболочек вариационными методами:

$$|\bar{u} - \bar{u}_0| \leq C \cdot \Delta f,$$

где $\Delta f = \max |\Delta f_k|$, $\bar{u} = \{u, v, w\}$ - решение задачи с «точными» коэффициентами $f_k(\xi, \eta)$, $\bar{u}_0 = \{u_0, v_0, w_0\}$ - решение задачи с приближенными коэффициентами $f_k(\xi_i, \eta)$, C - константа, не зависящая от координаты ξ .

С учетом выражения для погрешностей Δf_k , с целью оценки погрешности решения задачи для трубки переменного сечения, получено выражение:

$$|\bar{u} - \bar{u}_0| \leq C \cdot D \cdot \Delta\xi, \quad (1)$$

из которого следует, что погрешность решения стремится к нулю при $\Delta\xi \rightarrow 0$, так как из физических соображений ясно, что функция $D(\xi, \eta)$ является непрерывной и ограниченной.

В результате сделан следующий вывод: разбивая продольную ось трубки на достаточно большое число участков можно получить решение с небольшой погрешностью. При этом деформации трубки на каждом участке могут быть определены с использованием метода расчета трубки постоянного сечения.

Во втором параграфе для расчета каждой части с постоянными геометрическими параметрами подробно рассмотрен метод расчета, предложенный Э.Л. Аксельрадом и Б.Н. Васильевым. Указанный метод основан на интегрировании системы дифференциальных уравнений, описывающих осесимметричный изгиб тонкостенной трубки:

$$\begin{aligned} \psi'' - \mu_0 \theta \cos \alpha_0(\eta) &= -m \sin \alpha_0(\eta) \\ \theta'' + \mu_0 \psi \cos \alpha_0(\eta) &= -\lambda f_0(\eta) \end{aligned} \quad (2)$$

(штрихом отмечено дифференцирование по η).

В уравнениях искомыми являются функции $\psi(\eta)$ и $\theta(\eta)$, определяемые выражениями $\theta(\eta) = \alpha_0(\eta) - \alpha(\eta)$, $\psi(\eta) = \sqrt{12(1-\nu^2)} \frac{r}{Eh^2} \int_0^\eta T_1 d\eta$, где α - угол наклона касательной (см. рис.3), T_1 - нормальное усилие на единицу длины поперечного сечения, $r = \Pi/2\pi$ - приведенный радиус сечения (Π - периметр сечения), h - толщина стенки трубки, ν и E - соответственно коэффициент Пуассона и модуль упругости. Входящие в уравнения параметры μ_0 и m учитывают кривизну продольной оси и ее изменение: $\mu_0 = \sqrt{12(1-\nu^2)} \frac{r^2}{R_m h}$, $m = \mu - \mu_0$; λ - параметр внутреннего давления q в трубке: $\lambda = 12(1-\nu^2)qr^3 / Eh^3$. Функция $f_0(\eta)$ определена выражением: $f_0(\eta) = -\cos \alpha_0 \int_0^\eta \cos \alpha_0 d\eta - \sin \alpha_0 \int_{\frac{\pi}{2}}^\eta \sin \alpha_0 d\eta$. Индексом «0» снабжены величины, относящиеся к недеформированному состоянию.

Решение системы уравнений (2) ищется методом гармонического баланса. Основная сложность при решении заключается в задании конкретной формы поперечного сечения.

В третьем параграфе для наиболее точного описания действительной формы сечения, геометрические параметры которого изменяются в широких пределах, предложена схема «сечение из элементов постоянной кривизны». На основе этой схемы выведены формулы для определения коэффициентов s_j, c_j тригонометрических рядов Фурье функций $\sin \alpha_0(\eta)$, $\cos \alpha_0(\eta)$, которые и определяют форму сечения. Полученные формулы позволяют задать сечение как с двумя, так и с одной осью симметрии.

В четвертом параграфе на основе общих энергетических теорем деформируемого тела выведены формулы для определения технических характеристик трубки с переменным по длине сечением. Для принятой модели трубки пе-

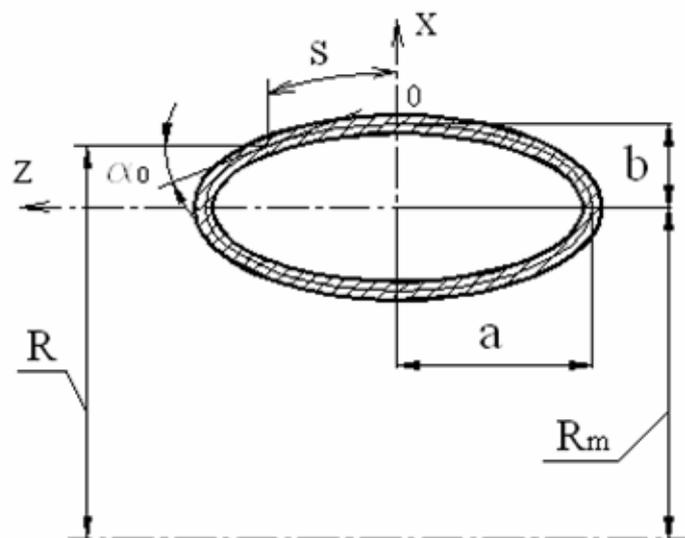


Рис.3. Задание формы сечения трубки

ременного сечения характеристики определяются деформациями каждой отдельной части с постоянным сечением.

Поясним определение характеристик на примере определения чувствительности по ходу. Перемещение L свободного кончика пружины найдено по формуле Мора:

$$L = \int_0^s \frac{M_p M_1}{B} ds,$$

(интегрирование идет по длине продольной оси трубки). В результате разбиения интервала интегрирования на n равных участков изгибающий момент на каждом участке определен через изменение кривизны продольной оси части трубки постоянного сечения, которое на каждом участке определяется из решения системы уравнений (2). После приложения к кончику пружины единичной силы, направленной по радиусу продольной оси и по касательной к радиусу, получено выражение для чувствительности по ходу:

$$k = \frac{L}{q} = \frac{R_m^2 \sqrt{12(1-\nu^2)}}{E} \sqrt{\left(\int_0^\gamma \frac{rm}{h^2 \lambda} (1 - \cos \omega) d\omega\right)^2 + \left(\int_0^\gamma \frac{rm}{h^2 \lambda} \sin \omega d\omega\right)^2},$$

где γ - угол раскрытия трубки, ω - текущее значение угла, определяющего положение каждой части с постоянным сечением, m/λ - параметр, характеризующий изменение кривизны продольной оси части трубки с постоянным сечением.

Особенностью полученных формул является необходимость численного интегрирования входящих в них выражений.

В пятом параграфе, используя полученные формулы, проведена оценка

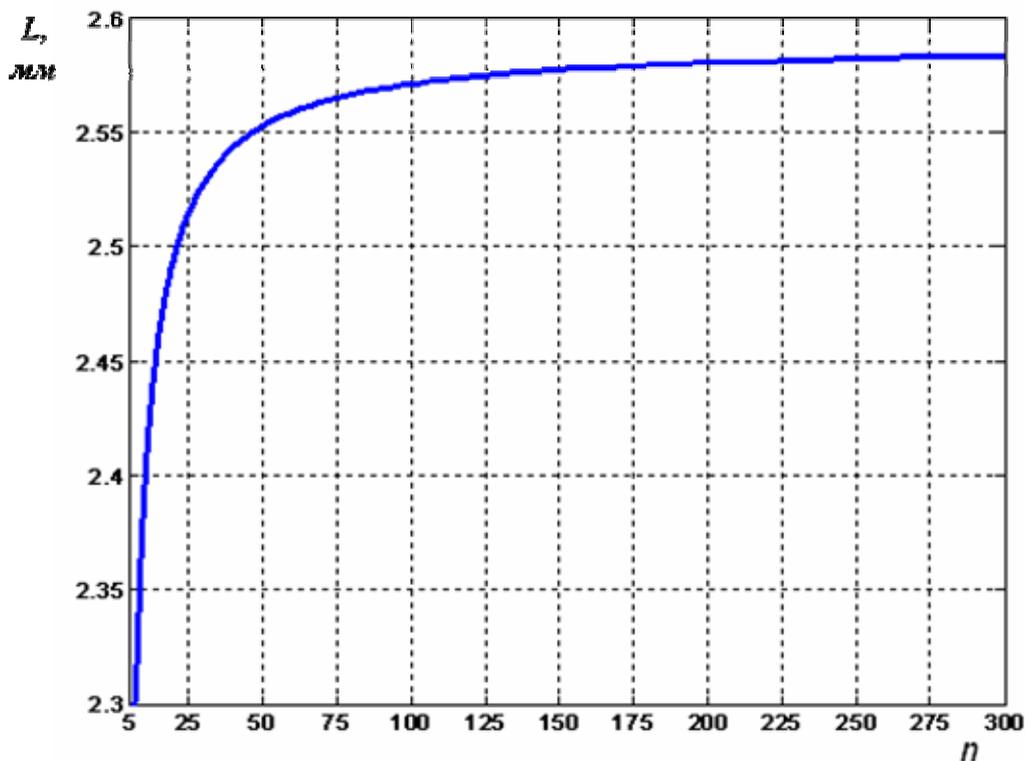
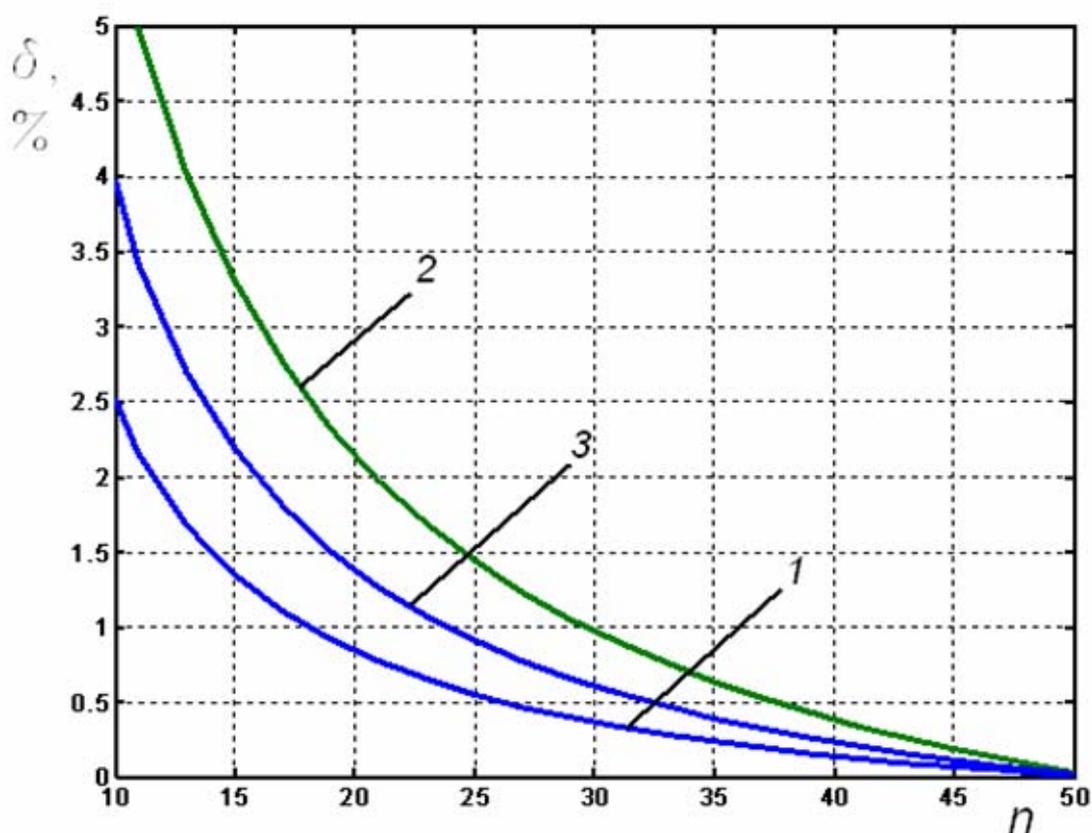


Рис.4. Оценка сходимости решения

сходимости решения: результаты численного эксперимента показали, что с увеличением количества частей, на которые разбивается пружина, величина перемещения конца манометрической трубки стремится к некоторому конечному пределу (см. рис.4).

Точность предложенного решения существенно зависит от числа частей, на которые разбивается пружина. Вследствие этого в этом параграфе также проведено исследование скорости сходимости решения к «предельному» решению для трех типов пружины переменного сечения. За «предельное» принято решение с тремя верными знаками после запятой. Так как конструкция пружины переменного сечения определяется большим числом геометрических параметров, при исследовании была использована классификация пружин по типу начальное – конечное сечение при прочих одинаковых параметрах.



Типы трубок:
 1 – осьминообразное сечение - «эллипс», 2 – плоский овал – плоский овал,
 3- плоский овал - «эллипс»

Рис.5. Погрешность решения для трех типов манометрической трубки

Проведенное исследование показало, что на скорость сходимости решения значительное влияние имеет разность параметра вытянутости сечения a/r . Так, оказалось, что для достижения относительной погрешности в 2% пружину типа осьминообразное сечение - «эллипс» ($a/r = const$) достаточно разбить на 12 частей, пружину типа плоский овал – плоский овал (с максимальной разно-

стью параметра a/r) – на 23 части, пружину типа плоский овал - «эллипс» (промежуточная величина разности a/r) – на 17 частей. Однако, для достижения относительной погрешности в 1% продольную ось пружины для любого из рассмотренных типов достаточно разбить на 40 частей (см. рис.5).

В шестом параграфе, используя полученное решение, исследовано влияние переменных параметров сечений на характеристики указанных выше типов пружин. В результате установлено, что в кинематическом режиме пружины рассмотренных типов по характеристикам перед пружинами с постоянным сечением преимуществ не имеют. Однако, если конструкции пружин типа плоский овал – плоский овал, плоский овал - «эллипс» проигрывают по характеристикам существенно, то пружина типа восьмеркообразное сечение - «эллипс» отличается по чувствительности и коэффициенту жесткости от пружины постоянного сечения с наилучшими значениями этих характеристик незначительно: отличие по чувствительности не более 2%, по коэффициенту жесткости – не более 4,5%.

В силовом режиме работы преимущество перед пружинами постоянного сечения имеет конструкция пружины типа плоский овал – плоский овал - тяговое усилие этой конструкции выше тягового усилия пружины с «наилучшим» плоскоовальным сечением на 12%.

Характеристики конструкций типа плоский овал – «эллипс» и восьмеркообразное сечение - «эллипс» в силовом режиме работы немного меньше наилучших в этом отношении пружин с постоянным «эллиптическим» сечением: расхождение по тяговому моменту менее 3,5%, по тяговому усилию – менее 1%.

В седьмом параграфе разработан алгоритм расчета пружины переменного сечения с заданной допускаемой погрешностью. Предложенный алгоритм реализован в пакете прикладных программ «Модуль», который оснащен интерфейсом пользователя, что позволяет достаточно просто осуществить ввод данных для расчета, контроль геометрических параметров пружины и визуализацию результатов решения (см. рис.6).

Пакет программ написан на языке программирования системы компьютерной математики «MATLAB» и может быть использован для расчета пружин как с переменным, так и с постоянным сечением.

При расчете задание формы сечения осуществляется по схеме «сечение из элементов постоянной кривизны», что позволяет определять характеристики разнообразных конструкций пружин.

Пакет программ обеспечивает выполнение следующих функций:

- визуальный контроль формы сечения рассчитываемой пружины на свободном и закрепленном концах манометрической трубки;
- определение технических характеристик пружины при указанном режиме работы;
- построение эпюр максимальных продольных, поперечных и эквивалентных напряжений вдоль контура сечения пружины.

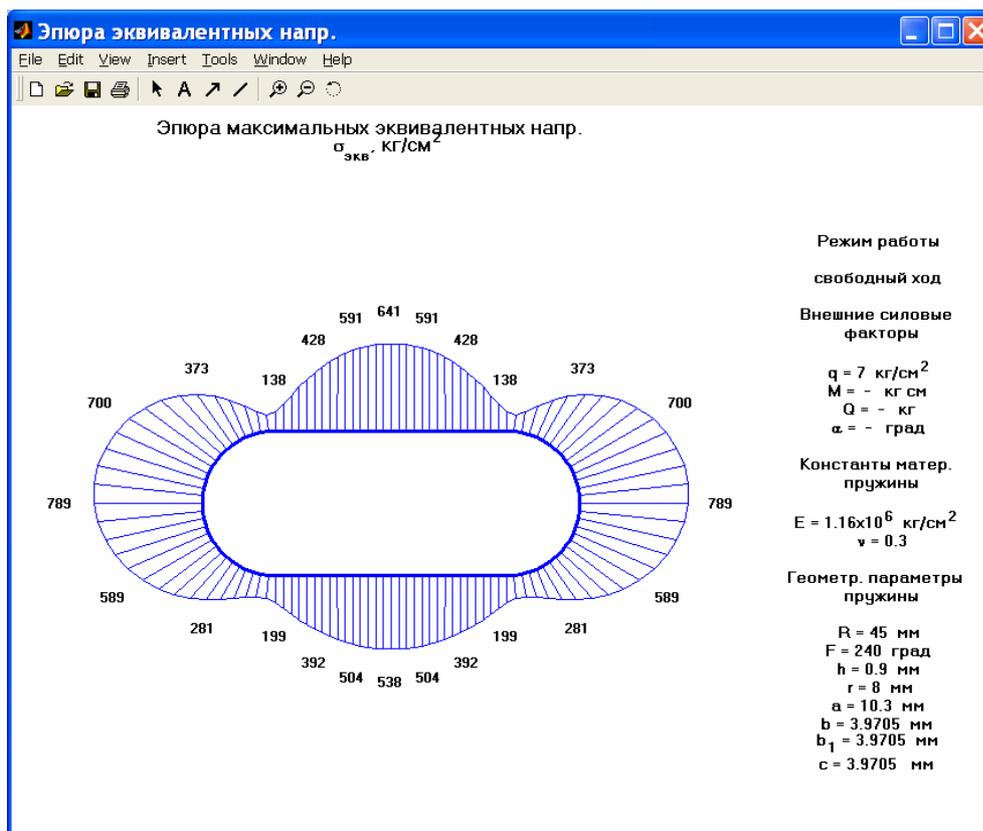


Рис.6. Оценка напряженного состояния пружины

В третьей главе с целью оценки достоверности предложенного решения проведено экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния пружин с переменным по длине сечением в режиме свободного хода.

В первом параграфе поставлены задачи эксперимента:

- определение перемещений свободного конца пружины;
- определение напряжений в отдельных точках поверхности пружины, распределенных вдоль ее продольной оси;
- проверка линейности зависимости деформаций пружины от внутреннего давления.

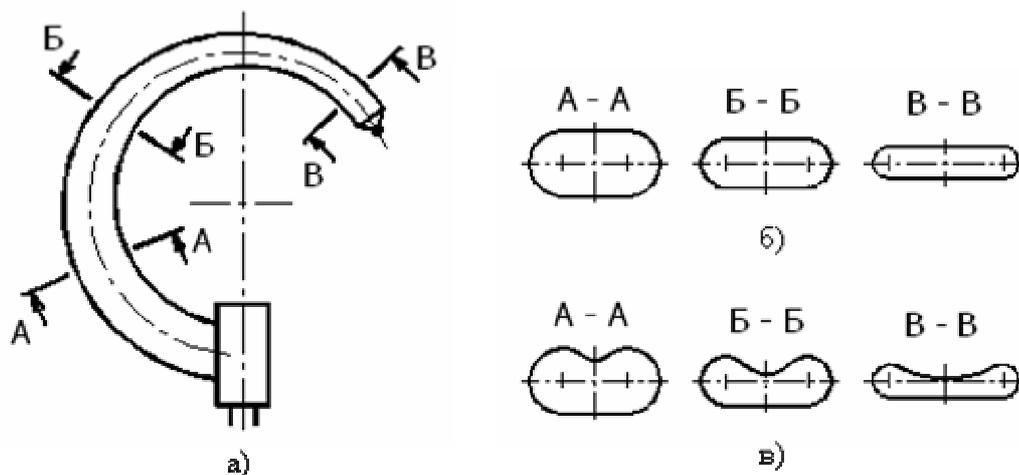
При подготовке к эксперименту было изготовлено семь образцов манометрических пружин с переменным плоскоовальным и переменным В-образным сечением, см. рис.7. При изготовлении образцов использовалась традиционная технология, в которую было внесено изменение – при навивке пружин вместо роликов были применены кулачки, см. рис.8.

Для решения двух первых задач эксперимента была сформулирована следующая статистическая гипотеза: результат измерения перемещения свободного кончика пружины или относительной деформации в точке поверхности является случайной величиной, распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием равным теоретическому значению измеряемой величины.

Для проверки этой гипотезы было принято решение использовать t-статистику – при выполнении условия:

$$t_{p,f} > t'_{p,f}, \quad (3)$$

(где $t'_{p,f}$ - табличное значение критерия Стьюдента, $t_{p,f}$ - критерий Стьюдента, определенный по результатам наблюдений) расхождение между теоретическими и экспериментальными данными можно считать неслучайным.



а - общий вид изготовленных образцов; б - сечения пружин 1-ого типа;
в - сечения пружин 2-ого типа

Рис. 7. Типы изготовленных пружин

При решении третьей задачи эксперимента статистическая гипотеза была сформулирована следующим образом: отклонения величины перемещения кончика пружины от линейной зависимости полностью обусловлены случайными погрешностями эксперимента. Это означает, что выборочные дисперсии рассеяния средних значений перемещений от прямой и дисперсия воспроизводимости являются оценками одной генеральной дисперсии. Для того чтобы эта гипотеза могла быть принята, должно быть выполнено условие:

$$F_{p,f_1,f_2} < F'_{p,f_1,f_2}, \quad (4)$$

где $F_{p,f_1,f_2} = D_r/D_w$ - дисперсионное отношение, определяемое по результатам эксперимента; F'_{p,f_1,f_2} - табулированные значения критерия Фишера.

Для того чтобы иметь возможность оценить значимость отклонений экспериментальных и теоретических данных была определена погрешность эксперимента: $\Sigma = \sqrt{\Delta_\Sigma^2 + \Omega^2 + \delta^2}$, где Δ_Σ - погрешность, вызванная ошибками измерения геометрических параметров и отклонением констант материала от действительных; Ω - погрешность, обусловленная случайными ошибками измерений; δ - систематическая погрешность измерений.

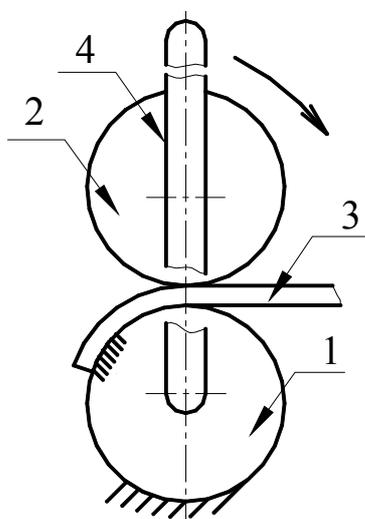
В первом параграфе также приведено описание методики измерения изготовленных образцов пружин и определения погрешностей измерения их геометрических параметров. Величина погрешности Δ_Σ была найдена численным расчетом с использованием пакета прикладных программ «Модуль». При таком расчете каждый из параметров вводился со своей погрешностью при фиксированных остальных (взятых без погрешностей, по среднему значению).

Величины погрешностей Ω и δ зависят от принятых методов и средств измерений.

Во втором параграфе для определения перемещения свободного кончика каждого изготовленного образца была сконструирована и изготовлена установка (см. рис.9). Принцип ее действия заключается в фотосъемке положения кончика пружины, которое он занимает при создании внутреннего давления в пружине, при этом на фотографии также фиксируется положение кончика в начальном положении (до подачи давления). Полученное таким образом изображение обрабатывается при более чем 100-кратном увеличении в графической компьютерной программе, позволяющей определять расстояния между любыми точками на плоскости (была использована программа «AutoCad»).

Для описанной установки были выделены и оценены три вида систематических погрешностей измерения. В результате установлено, что величина первой и третьей погрешности не превышает 0,2%; вторая погрешность является ограниченной и была учтена при определении перемещений в виде поправки.

С целью определения случайной относительной погрешности измерений перед основной серией опытов по определению перемещений кончика пружины была осуществлена выборка, состоящая из 31 измерения. В результате определены среднее арифметическое значение, дисперсия рассеяния, среднее квадратическое отклонение.



1 и 2 – подвижный и неподвижный кулачок; 3 – трубка-заготовка; 4 - рычаг

Рис.8. Схема профилирования пружины

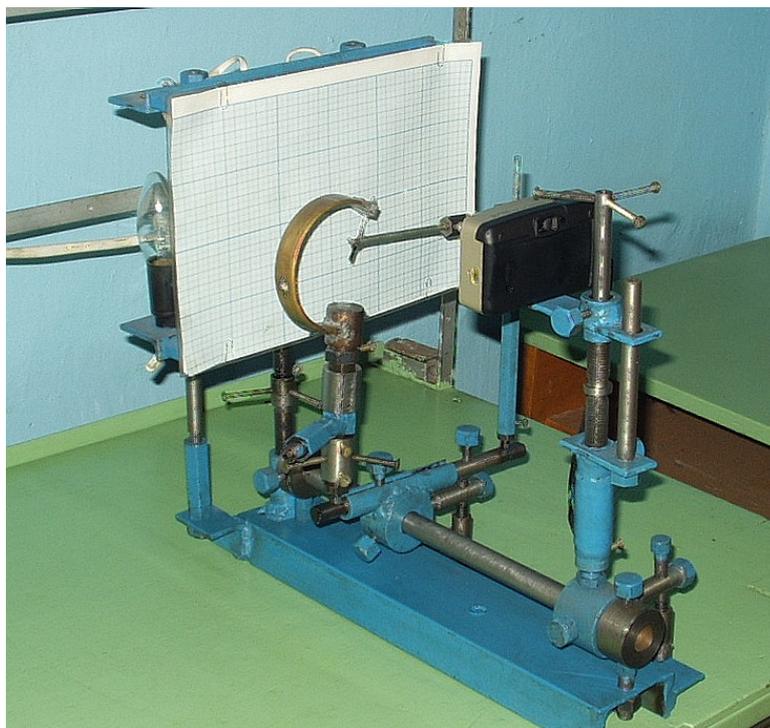


Рис.9. Установка для определения перемещений кончика пружины

Проведенная проверка принадлежности полученного ряда значений перемещений нормальному закону распределения (по ГОСТ 8.207-76) дала положитель-

ный результат. Случайная относительная погрешность измерения составила 1,7%. С целью снижения ее величины измерение перемещения кончика каждого образца было решено проводить с 5-кратным повторением, при этом относительная погрешность измерения составила 0,8%.

Для того чтобы принять среднее квадратическое отклонение за величину одинаковую при испытании всех образцов, была проведена проверка воспроизводимости опытов по критерию Кохрена. В результате установлено, что опыты воспроизводимы. За среднее квадратическое отклонение общее для всех серий опытов, была принята его верхняя оценка (с доверительной вероятностью 0,95), при этом относительная погрешность измерений при пяти наблюдениях составила 1,2%.

Вследствие того, что полученная случайная погрешность много меньше погрешности Δ_{Σ} , отклонение экспериментальных данных от теоретических мы считали незначимым при выполнении условия:

$$|\theta| < \Delta_{\Sigma}, \quad (5)$$

где θ относительное отклонение теоретических данных от экспериментальных:

$$\theta = \frac{\text{теор.} - \text{эксперим.}}{\text{эксперим.}} 100\%. \quad (6)$$

В табл.1 приведены экспериментальные и теоретические значения чувствительности по ходу для всех образцов пружин. Теоретическое значение чувствительности каждой пружины найдено как угловой коэффициент уравнения прямой, построенной по опытным данным методом наименьших квадратов. Как видно из табл.1, условие (5) выполнено для всех образцов.

Таблица 1. Результаты определения перемещений свободного конца изготовленных образцов

№	$D_r, 10^3$	D_r/D_w	F_t	$K = l/q, \text{ мм/мПа}$		$\theta, \%$	$\Delta_{\Sigma}, \%$
				опыт	теория		
1	0,315	0,49	4,9	6,99	7,37	5,1	9,7
2	2,3	3,58	3,8	9,73	10,76	9,6	16,4
3	2,2	3,43	4,9	8,70	8,88	2,0	9,7
4	1,7	2,65	4,2	62,13	65,12	4,6	12,0
5	0,65	1,01	4,2	38,5	41,8	7,9	13,0
6	6,8	10,6	4,2	7,1	7,5	5,3	18,4
7	3,3	5,1	6,2	100,5	106,2	5,3	10,5

Проверка линейности зависимости перемещений от величины давления проведена по условию (4). Из полученных данных, приведенных в табл.1, видно, что это условие выполнено для всех образцов пружин кроме образца №6. Однако, значимое отклонение дисперсии рассеяния от дисперсии воспроизводимости в этом случае можно объяснить падением точности измерений вследствие большой толщины стенки образца.

В третьем параграфе исследовано напряженное состояние изготовленных пружин с использованием метода электротензометрирования, при этом были применены фольговые тензорезисторы марок: 2ФКП–5–200 и 2ФКП–5–400, базой 5 мм.

Напряженное состояние исследовалось в точках поверхности, распределенных вдоль манометрической трубки, на двух образцах пружин - №6 (В-образное сечение) и №7 (плоскоовальное сечение). Относительные деформации (ε_1 – продольные и ε_2 – поперечные), измеряемые каждым тензорезистором, указаны в табл.2. Для измерения относительных деформаций был использован измеритель ИТЦ-01 Орловского государственного технического университета с погрешностью измерений 1,0%, работающий по схеме моста Уитстона.

Для оценки случайной погрешности измерений, перед основной серией опытов была осуществлена выборка, состоящая из 20-ти наблюдений показаний тензорезистора №2 на образце пружины №7. В результате получены среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонения относительного изменения сопротивления тензорезистора ($\Delta r/r$), относительная случайная погрешность составила 3,3%.

Проверка принадлежности полученной выборки нормальному закону распределения (по ГОСТ 8.207-76) дала положительный результат, также подтвердилась воспроизводимость опытов (проверялась по критерию Кохрена).

Погрешность, обусловленная отклонением геометрических размеров сечений, в которых наклеены тензорезисторы, и отклонением коэффициента Пуассона была определена по формуле:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{a/r}^2 + \Delta_{b/b_1}^2 + \Delta_h^2 + \Delta_r^2 + \Delta_v^2},$$

где $\Delta_{a/r}$ и Δ_{b/b_1} – погрешности, вызванные отклонением действительных параметров a/r и b/b_1 от задаваемых при расчете теоретических относительных деформаций.

Так как случайная погрешность измерений и погрешность Δ_{Σ} сравнимы между собой, оценка значимости отклонений теоретических данных от экспериментальных была проведена по условию:

$$|\theta| < \Sigma, \quad (7)$$

где θ относительное отклонение теоретических данных от экспериментальных, рассчитываемое по ф.(6), Σ – общая погрешность эксперимента.

В табл.2 приведены величины экспериментальных и теоретических относительных деформаций, приходящихся на единицу давления, там же приведены значения η – относительные отклонения показаний тензорезисторов при нагрузке и разгрузке образца №7 по нулевым показаниям (при $q = 0$ МПа), позволяющие оценить гистерезис и качество наклейки тензорезисторов. Для образца

пружины №6 данные, полученные экспериментально, имеют большие отклонения от результатов теоретического решения, что вызвано низкой точностью их определения.

Таблица 2. Результаты тензометрирования образца пружины №7

$\varepsilon/q,$ $10^{-5}/\text{МПа}$	Номера тензорезисторов					
	1 (ε_1)	2 (ε_1)	3 (ε_1)	4 (ε_2)	5 (ε_2)	6 (ε_2)
$\eta, \%$	< 2.0				4,3	1,0
$\Sigma, \%$	9,8	9,7	9,9	4,3	4,6	4,6
Экспер.	82,3	63,7	68,9	142,8	100,3	114,3
Теория	77,9	69,1	62,6	101,7	91,3	87,4
$\theta, \%$	-5,3	8,6	-9,2	-28,8	-8,9	-23,5

В результате оценки значимости расхождений экспериментальных и теоретических данных, с учетом неучтенной в эксперименте поперечной чувствительности тензорезисторов, было установлено, что напряженное состояние пружин переменного сечения с плоскоооальной и В-образной формой сечения хорошо согласуется с теоретическим.

В заключении кратко изложены обладающие научной новизной положения диссертации и наиболее значимые результаты, полученные в работе:

1. Проведенный анализ работы манометрической пружины в различных режимах работы, анализ характера деформации манометрической пружины постоянного и переменного сечения позволил предложить новые конструкции пружин, защищенные патентами.
2. Создан метод расчета пружин переменного сечения, в основу которого положена гипотеза о пренебрежимо малом взаимном влиянии деформаций поперечных сечений пружины.
3. Для наиболее точной аппроксимации профиля поперечного сечения пружины, геометрические параметры которого могут изменяться в широких пределах, предложена схема «сечение из элементов постоянной кривизны».
4. Решение задачи изгиба с заданной погрешностью для пружины переменного сечения реализовано на ЭВМ с помощью пакета прикладных программ «Модуль».
5. Результаты исследований характеристик трех типов манометрической пружины переменного сечения показывают, что действительно пружины переменного сечения при работе в режиме силовой компенсации могут иметь лучшие характеристики, чем пружины с постоянным сечением, на-

пример, тяговое усилие \tilde{Q}_m пружины типа плоский овал – плоский овал выше этой характеристики пружины с постоянным плоскоовальным сечением на 12%.

6. Экспериментальное исследование деформаций пружин с переменным сечением подтверждает приемлемую точность предложенного метода расчета для практики.
7. Результаты экспериментального исследования напряженного состояния пружин переменного сечения обнаруживают совпадение теоретических и экспериментальных напряжений в точках поверхности пружины, распределенных вдоль ее продольной оси, что позволяет заключить: полученное решение задачи изгиба пружины переменного сечения может быть успешно применено для оценки ее напряженного состояния.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Пирогов С.П., Самакалев С.С., Устинов Н.Н. О расчете трубки Бурдона с переменным вдоль ее оси сечением//Сб. науч. тр. Актуальные вопросы в АПК/Тюменская с.-х. акад. – 2002. – с.228 – 230.
2. Пирогов С.П., Самакалев С.С., Устинов Н.Н. Исследование чувствительности и жесткости манометрических пружин с различной формой поперечного сечения//Тез. докл. межд. научно-практ. конф.: «Проблемы эксплуатации транспортных систем в суровых условиях». – Тюмень: ТюмГНГУ, - 2002, - с.79-85.
3. Самакалев С.С. Манометрические трубчатые пружины с асимметричным поперечным сечением//Транспортный комплекс – 2002: Материалы научно-практического семинара Международной выставки-ярмарки «Город - 2002», «АЗС комплекс - 2002», «Автосалон - 2002». - Тюмень: ТюмГНГУ, 2002, с.181-186.
4. Дорофеев С.М., Пирогов С.П., Самакалев С.С. Приближенное решение задачи об изгибе манометрической пружины переменного сечения//Сб. научных трудов «Мегапаскаль». - Тюмень: ТюмГНГУ, 2006, №2, с.46-48.
5. Самакалев С.С., Пирогов С.П. Исследование чувствительности и жесткости манометрических трубчатых пружин переменного сечения//Известия Вузов. Нефть и газ, 2003, №3, с.69-76.
6. Самакалев С.С., Чуба А.Ю., Пирогов С.П. Повышение вибростойкости манометрических приборов, используемых в автомобильном и трубопроводном транспорте//Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта: материалы региональной научно-практической конференции. Ч.2. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2004, с.54-59.
7. Самакалев С.С. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния манометрических пружин переменного сечения//Естественные и технические науки, 2005, №2, с.175-184.
8. Патент 2215273 РФ, МПК 7, кл. G 01 L 7/04. Манометрическая пружина./Самакалев С.С., Пирогов С.П. – 2002126835/28; Заяв. 07.10.2002; Опубл. 27.10.2003; Бюл. №30.

9. Патент 2215274 РФ, МПК 7, кл. G 01 L 7/04. Манометрическая трубчатая пружина/С.С.Самакалев, С.П.Пирогов. – 2002127092/28; Заяв.10.10.2002; Оpubл.27.10.2003; Бюл.№30.
10. Патент 2216001 РФ, МПК 7, кл. G 01 L 7/04. Манометрическая трубчатая пружина (варианты)/С.П.Пирогов, Н.П.Митягин, Н.Н.Устинов, С.С.Самакалев. – 2001122276/28; Заяв.08.08.2001; Оpubл.10.11.2003; Бюл.№31.
11. Патент 2241966 РФ, МПК 7, кл. G 01 L 7/04. Манометрическая пружина (варианты)/С.С.Самакалев, С.П.Пирогов, Н.И.Смолин. – 2003101757/28; Заяв.21.01.2003; Оpubл.10.12.2004; Бюл.№34.
12. Свидетельство об официальной регистрации программы ЭВМ 2005610556 РФ. Программный комплекс «Модуль для расчета трубчатых манометрических пружин»/Самакалев С.С., Пирогов С.П., Смолин Н.И. – 2005610024; Заяв. 11.01.2005; Оpubл. 20.06.2005; Бюл.№2(51). – с.129-130.