

15343/3

На правах рукописи

БАРЫШНИКОВА Ольга Олеговна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
УПРУГИХ ТРУБЧАТЫХ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность 01.02.06 - динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры.

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1997



1554313

Барышникова О.О. Разраб

Работа выполнена в Московском Государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Гаврюшин С.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Стасенко И.В.

доктор технических наук,
профессор Усюкин В. И.

Ведущее предприятие - Научно-исследовательский институт
радиокомпонентов (НИИ РК)

Защита диссертации состоялась "10"
в 14.30 часов на
Д 053.15.08 при М
университете им. Н.

107005, Москва,

С диссертацией
МГТУ им. Н.Э.Баум

Автореферат раз

Ученый секретарь
специализированног
к.т.н., доцент

A

1554313

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1554313
боть

Актуальность проблемы. Детали и конструктивные элементы в форме гибких стержней и оболочек широко используются в современной технике. Последние годы характеризуются появлением ряда принципиально новых промышленных технологий и продолжающейся разработкой перспективных машин, приборов и технических устройств. Потребности вакуумной техники и технологии привели к возникновению нового класса робототехнических систем - "белых" роботов, используемых для межоперационной транспортировки и позиционирования полуфабрикатов изделий электронной техники при нанесении тонких пленок в условиях вакуума или сверхчистой среды. В качестве исполнительных механизмов робототехнических систем, работающих в условиях вакуума или сверхчистых сред практически вне конкуренции оказались механизмы, построенные на базе гибких трубчатых манометрических элементов. Процесс деформирования таких гибких упругих элементов зависит от целого комплекса внешних параметров и является существенно нелинейным. Наряду с традиционными требованиями прочности, долговечности и надежности к гибким упругим элементам, используемым в робототехнических системах, предъявляется ряд дополнительных и специфических требований, таких как экологическая чистота, возможность реализации дискретного срабатывания, обеспечение больших упругих перемещений при относительно малых энергозатратах. Задачи возникающие при расчете и проектировании гибких упругих манометрических элементов, используемых в конструкциях исполнительных устройств робототехнических систем, во многих случаях не укладываются в рамки традиционных подходов. Эти задачи требуют использования специальных подходов, уточненного расчета и дополнительного анализа,

Целью диссертационной работы является разработка методики расчета и проектирования гибких трубчатых манометрических элементов, используемых в конструкциях исполнительных, предохранительных и чувствительных устройств робототехнических систем, в том числе систем, предназначенных для работы в условиях вакуума и сверхчистых сред. Достижение указанной цели предполагает:

- теоретическое изучение, сравнительный анализ, классификацию существующих конструкций упругих трубчатых манометрических элементов, используемых в технике;
- разработку численных моделей, позволяющих исследовать сложное нелинейное поведение гибких упругих трубчатых манометрических элементов при сложном многопараметрическом характере нагружения;
- создание алгоритма численного анализа и пакета прикладных программ для решения задач расчета и проектирования гибких трубчатых

манометрических элементов;

- проведение анализа достоверности и точности получаемых результатов на модельных задачах и в сравнении с результатами других авторов, оценка эффективности предложенной методики;
- проведение экспериментальной проверки достоверности полученных в работе результатов;
- выдачу рекомендаций по проектированию существующих и перспективных конструкций на основе проведенного комплекса численных исследований влияния конструктивных параметров на рабочие характеристики элементов.

Научную новизну диссертационной работы составляет решение комплекса вопросов, связанных с численными и экспериментальными исследованиями гибких манометрических упругих трубчатых элементов, включающего:

- алгоритм численного исследования и прикладное программное обеспечение, предназначенное для проведения прикладных расчетов на ПЭВМ;
- уточненные и новые результаты относящиеся к исследованию задачи сильно нелинейного деформирования гибких криволинейных стержней;
- уточненные и новые результаты относящиеся к численному исследованию нелинейного поведения трубчатого элемента.

Достоверность результатов. Достоверность результатов исследований оценивается сопоставлением результатов тестовых расчетов с приведенными в литературе данными других авторов, сравнением с результатами известных экспериментальных исследований, а также экспериментальных исследований автора.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены на Республиканском научно-техническом семинаре "Современные проблемы механики и управления в машиностроении" (Иркутск, 1988) ; Всероссийской научно-технической конференции "Автоматизация исследований, проектирования и испытаний сложных технических систем"(Калуга, 1993); Всероссийской научно-технической конференции "Автоматизация исследований, проектирования и испытаний сложных технических систем технологических процессов" (Калуга, 1994); второй Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук" (Москва, 1994); научно-технической конференции "Приборостроение - 94"(Винница - Симферополь, 1994); Международной научно-технической конференции "Совершенствование энергетических и транспортных турбоустановок методами математического моделирования, вычислительного и физических экспериментов" (Харьков, 1994); третьей Международной научно-технической конференции "Контроль и

управление в технических системах" (Винница, 1995); научно-технической конференции, посвященной 165-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 1995); Международном научном конгрессе студентов, аспирантов и молодых ученых "Молодежь и наука - третье тысячелетие" (Москва, 1996); Международной конференции по теории приближений (Калуга, 1996), на научных семинарах кафедры "Прикладная механика" МГТУ 1994-96г. г.

Публикации. Основное содержание диссертации представлено в 12 статьях и тезисах докладов конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, раздела с основными выводами по работе, списка литературы из 168 наименований. Общий объем работы 171 страница, включая 3 таблицы и 52 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы; обосновывается ее актуальность, научная новизна и практическая ценность. Формулируются цели и задачи исследования. Введение завершается кратким изложением содержания всех разделов диссертации.

Первая глава посвящена обзору методов расчета и проектирования гибких упругих элементов. Современное состояние теории тонкостенных конструкций обогатили идеи С.А.Алексеева, В.Л.Бидермана, И.Г.Бубнова, В.З.Власова, А.С.Вольмира, И.И.Воровича, К.З.Галимова, А.Л.Гольденвейзера, Л.Доннела, В.Койтера, А.Л.Лурье, Х.М.Муштари, В.В.Новожилова, Э.Рейсснера, С.П.Тимошенко, В.И.Феодосьева и др. Различные теоретические аспекты и практические приемы расчетов и проектирования тонкостенных упругих элементов изложены в работах Э.Л.Аксельрада, Н.А.Алфутова, Н.В.Валишвили, Э.И.Григолюка, Е.П.Попова, В.И.Усюкина, В.А.Светлицкого, О.С.Нарайкина и других авторов.

Следует особо выделить работы В.И.Феодосьева, предложившего оригинальные методы расчета упругих тонкостенных элементов, в том числе и трубок Бурдона. Непосредственно исследованием тонкостенных трубчатых элементов в разные годы занимались Л.Е.Андреева, Л.Бескин, С.С.Гаврюшин, Н.Джонн, Т.Карман, Р.Кларк, В.В.Кузнецов, Ю.А.Куликов, С.В.Левяков, И.В.Стасенко, Д.Чен и др. Вопросы практического использования трубчатых упругих элементов для передачи и формирования движения в вакууме подробно рассмотрены в работах А.Т.Александровой.

В главе обосновывается необходимость разработки новой методики расчета нелинейного деформирования гибких упругих трубчатых элементов со сложной формой поперечного сечения, а также алгоритмов ее

численной реализации.

Во второй главе описываются перспективные гибкие трубчатые манометрические элементы, получившие широкое распространение в различных областях современной техники и технологии, в частности, использующиеся в качестве исполнительных механизмов робототехнических устройств, работающих в сверхчистых средах, - "белых роботов". Действие упругодеформируемых трубчатых элементов основано на эффекте, используемом в манометрических пружинах (трубках Бурдона). Известно, что деформация манометрической пружины в продольном направлении происходит вследствие деформации поперечного сечения. Манометрические элементы используются в конструкциях различных механизмов. Описываются основные виды пневматических пружин и приводится классификация механизмов, использующих манометрические элементы. К механизмам свободного перемещения относится устройство экранирования, использующееся в установках нанесения тонких пленок в различных вакуумно-термических установках. К механизмам силового воздействия относятся разнообразные захваты. Известны комбинированные многоцелевые механизмы на основе гибких герметичных трубчатых элементов, выполняющие как функции перемещения, так и силового воздействия. Манометрические элементы используются в конструкциях различных механизмов, примеры которых приведены на рис. 1. Вопросы проектирования и применения гибких элементов в механизмах вакуумной техники подробно изложены в работах А.Т.Александровой и ее сотрудников. Анализируются особенности расчета гибких трубчатых манометрических элементов. Подчеркивается, что для целого класса новых пневматических пружин, реализующих большие перемещения свободного конца, необходимо решать задачу нелинейного деформирования трубчатого элемента. Отмечается, что в большинстве известных на настоящий момент работ по исследованию нелинейного процесса деформирования трубчатых элементов прикладные задачи не рассматриваются, поэтому предлагаемые методики практически не пригодны при проведении расчетов и проектировании конструкций трубчатых элементов.

Для решения поставленных в работе задач требуется разработать новую методику расчета, позволяющую проводить численное исследование процессов нелинейного деформирования гибких трубчатых манометрических элементов, анализировать влияние различных параметров на процесс деформирования, учитывать особенности нелинейного процесса деформирования рассматриваемых элементов.

В третьей главе приведены основные соотношения, используемые для описания нелинейного поведения тонкостенных конструкций. Различные варианты соотношений для гибких стержней и осесимметричных

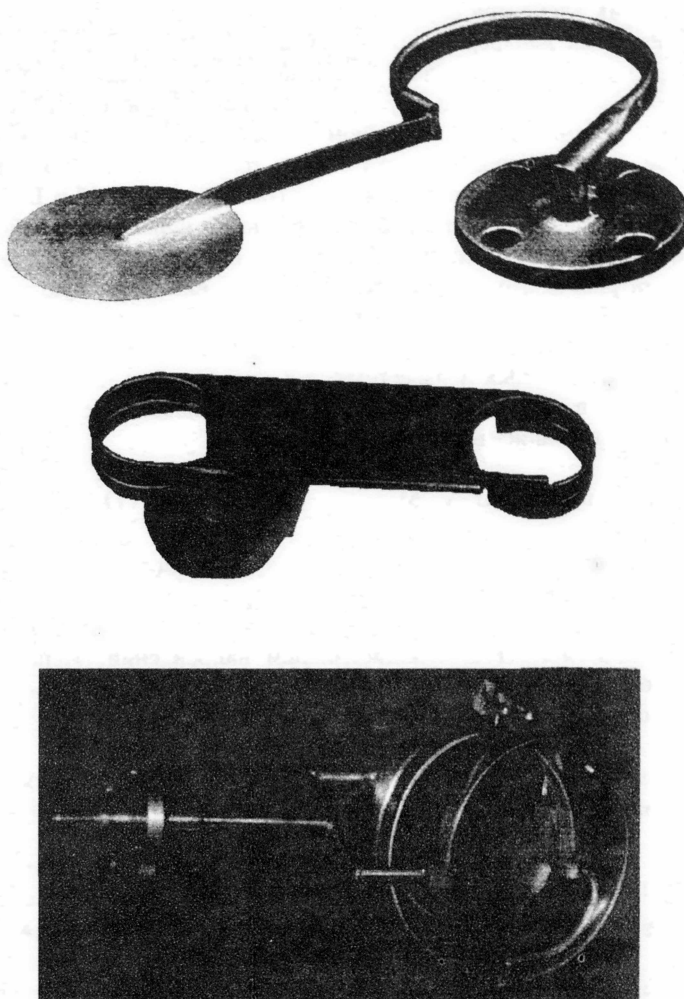


Рис.1.Механизмы, использующие манометрические элементы

оболочек приведены в работах Э.И.Григолюка и В.И.Шалашилина, Н.В.Валишвили, С.Д.Пономарева и Л.Е.Андреевой, Е.П.Попова, В.А.Светлицкого и О.С.Нарайкина и др.. Описание нелинейного поведения гибких элементов сводится к решению краевой задачи для системы нелинейных дифференциальных уравнений в обыкновенных производных. Для решения задачи нелинейного деформирования гибкого трубчатого элемента используется расчетная схема осесимметричной оболочки, незамкнутой в окружном направлении. В главе приводятся основные соотношения варианта теории тонких осесимметричных оболочек, сохраняющие преемственность с соотношениями Н.В.Валишвили (1968г.). Применительно к трубчатой оболочке уравнения модифицированы в соответствии с идеей Р.Кларка и Л.Е.Андреевой, предложившими рассматривать трубчатый элемент как осесимметричную оболочку, незамкнутую в окружном направлении. В качестве разрешающей системы используется система нелинейных дифференциальных уравнений относительно основных неизвестных, т.е. неизвестных, производные которых входят в уравнения. Вектор основных неизвестных в текущем сечении оболочки записывается в виде

$$X^T = \{ u, v, \psi, U, V, M_1 \}, \quad (1)$$

где u, v - горизонтальное и вертикальное перемещение текущей точки, перемещение, ψ - изменение угла наклона касательной к поверхности оболочки в текущей точке, U, V - продольное и поперечное усилия, M_1 - изгибающий момент в меридиональном направлении. Используемые при решении вспомогательные неизвестные однозначно определяются через основные с помощью алгебраических соотношений.

При исследовании оболочек, незамкнутых в окружном направлении, в систему уравнений входит величина χ - относительное изменение центрального угла, определяемое следующим выражением

$$\chi = \frac{\phi - \phi_0}{\phi_0}, \quad (2)$$

где ϕ_0 и ϕ - центральные углы оболочки до и после деформирования.

Для нахождения решения система дополнена условием, накладываемым на величину равнодействующей моментов внутренних сил в поперечном сечении. Из условия равновесия отсеченной части равнодействующий момент должен быть равен внешнему моменту:

$$M^* = \int_{s_0} [M_2 \sin \vartheta + (X - C)] ds_0 \quad (3)$$

где M_2 - изгибающий момент, действующий в окружном направлении, N_2 - нормальная сила, X - текущая координата, C - абсцисса центра давления сечения.

При отсутствии внешнего момента равнодействующий момент должен быть равен нулю. Из уравнения (3) может быть получено дифференциальное уравнение, которое дополняет основную систему дифференциальных уравнений. Следующим образом:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dv}{dS_0} &= (1 + \varepsilon_{10}) \sin \Psi - \sin \Psi_0 \\
 \frac{dS_0}{du} &= (1 + \varepsilon_{10}) \cos \Psi - \cos \Psi_0 \\
 \frac{dS_0}{d\Psi} &= (1 + \varepsilon_{10}) \chi_1 + \frac{d\Psi_0}{dS_0} \\
 \frac{dV}{dS_0} &= -(1 + \varepsilon_{10}) \left[\frac{\cos \Psi}{X_0 + u} V + q_V \right] \\
 \frac{dU}{dS_0} &= -(1 + \varepsilon_{10}) \left[\frac{\cos \Psi}{X_0 + u} U - \frac{N_2}{X_0 + u} + q_U \right] \\
 \frac{dM_1}{dS_0} &= -(1 + \varepsilon_{10}) \left[\frac{\cos \Psi}{X_0 + u} (M_1 - M_2) - U \sin \Psi + V \cos \Psi \right] \\
 \frac{dJ}{dS_0} &= M_2 \sin \vartheta + N_2 (X - C)
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Используя безразмерные переменные и вспомогательные величины краевая задача приводится к безразмерному виду. Для решения системы (4) используется подход, получивший название метода дискретного продолжения по параметру.

В четвертой главе рассматривается методика анализа многопараметрических задач нелинейного деформирования. Многопараметрическая задача рассматривается как семейство однопараметрических задач. При исследовании однопараметрических систем внешний параметр (параметр нагрузки) принимается равнозначным с внутренними параметрами системы. Задача исследования нелинейного деформирования на каждом шаге по параметру сводится к нелинейной краевой задаче.

В настоящей работе использовался метод дискретного продолжения по параметру в сочетании с методом многосегментной пристрелки, которая в свою очередь обеспечивает техническую устойчивость численного счета. Суть метода заключается в разбиении интервала интегрирования на отдельные участки, называемые сегментами, с последующей стыковкой их друг с другом. Таким образом двухточечная нелинейная краевая задача заменяется многоточечной. В качестве начального или "опорного" решения для шагового процесса использовалось тривиальное решение.

В настоящей работе метод дискретного продолжения по параметру применялся совместно с двухэтапной процедурой по схеме "предиктор - корректор". Этап "предиктор" позволяет с помощью квадратичных полиномов Лагранжа экстраполировать начальное значение расширенного вектора неизвестных $\mathbf{X}^{(0)}_{ext}$, используя три предыдущих равновесных состояния. На этапе "корректор" реализуется уточнение начального приближения с помощью итерационного метода Ньютона-Рафсона. Оценка точности решения проводится по норме вектора невязки.

Предлагаемая методика анализа многопараметрических задач и удовлетворяющие вышеприведенным требованиям алгоритм численного счета были реализованы в виде пакета прикладных программ для расчета процессов нелинейного деформирования перспективных гибких манометрических элементов.

В пятой главе для отработки предлагаемого алгоритма и проверки его достоверности рассмотрены тестовые примеры, связанные с анализом нелинейного поведения упругих элементов. В работе в качестве тестовой рассматривается задача о больших прогибах гибкого криволинейного стержня при несимметричном воздействии механической нагрузки. Гибкие криволинейные стержни могут быть использованы при моделировании нелинейного деформирования манометрической пружины Бурдона в случае, когда ее радиус стремится к бесконечности. Такой предельный переход позволяет проанализировать основные особенности рабочих характеристик манометрических пружин и протестировать алгоритм расчета манометрических пружин в нелинейной области на основе теории незамкнутых оболочек вращения.

Проведен расчет гибкого криволинейного стержня, схема которого приведена на рис. 2а. На рис. 2б, в и г показаны основные виды рабочих характеристик, которые получены в результате численного исследования. На рис. 3 изображена построенная по результатам численного анализа трехмерная диаграмма, которая показывает влияние радиуса кривизны на характер деформирования гибкого стержня. Диаграмма построена для случая несимметричного нагружения сосредоточенной си-

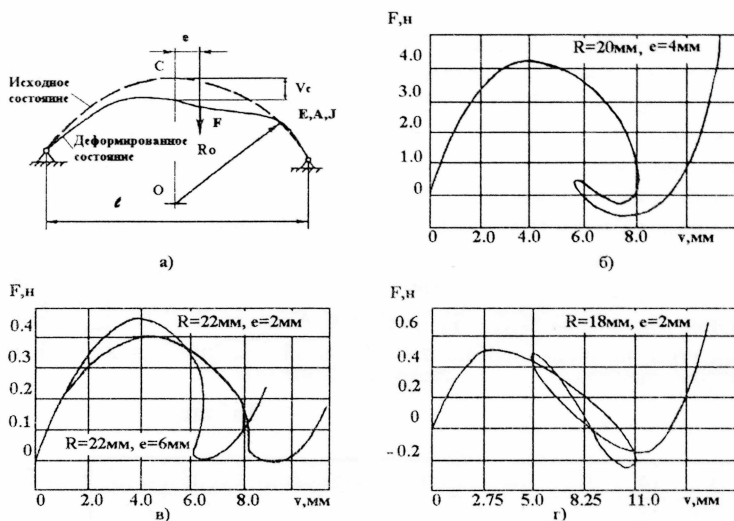


Рис. 2. Упругие характеристики двухпараметрического семейства гибких криволинейных стержней

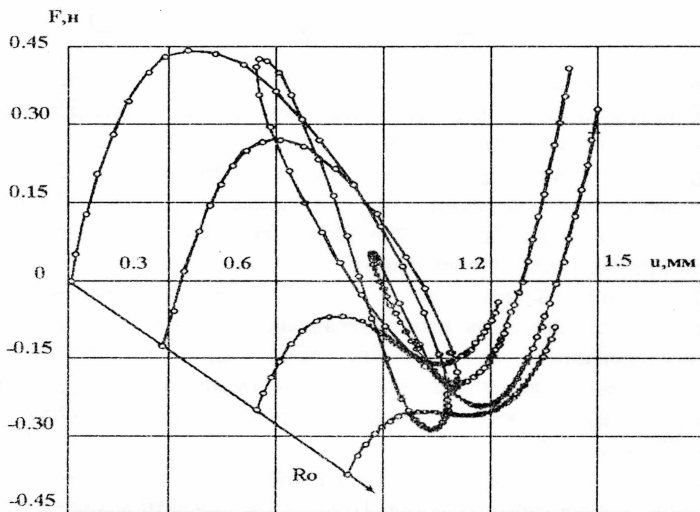


Рис. 3. Влияние радиуса кривизны на упругие характеристики

силой. Как видно из рисунка, изменение радиуса кривизны стержня приводит к качественному изменению рабочей характеристики.

Для проверки достоверности предложенного нелинейного алгоритма и программного комплекса были рассмотрены тестовые примеры, для которых известны аналитические решения и экспериментальные результаты. Была рассмотрена плоскоовальная манометрическая трубчатая пружина с полуосями a и b , радиус и толщина которой соответственно c и h . Материал рассматриваемых пружин характеризуется модулем упругости первого рода $E = 1 \cdot 10^5$ МПа, внутреннее рабочее избыточное давление 0,1 МПа. Результаты сравнения для различных сочетаний геометрических параметров приводятся в таблице 1 с использованием следующих обозначений: $\chi_{\text{э}}$ - относительный угол, полученный экспериментальным путем; $\chi_{\text{ф}}$ - решение Феодосьева В.И.; $\chi_{\text{в}}$ - решение Васильева Б.Н.; $\chi_{\text{а}}$ - решение Андреевой Л.Е.; $\chi_{\text{с}}$ - относительный угол, вычисленный по предлагаемой в работе нелинейной методике.

Таблица 1

N	c	a	b	h	$\chi_{\text{э}} 10^3$	$\chi_{\text{ф}} 10^3$	$\chi_{\text{в}} 10^3$	$\chi_{\text{а}} 10^3$	$\chi_{\text{с}} 10^3$
1	21.0	8.55	1.35	0.48	2.06	1.57	2.09	2.27	2.32
2	20.8	8.75	0.90	0.48	2.79	2.35	3.50	2.95	3.19
3	21.1	8.69	1.09	0.57	2.06	1.57	2.22	1.92	2.06
4	21.2	8.80	0.83	0.57	2.33	2.15	2.79	2.31	2.46

Для проверки разработанной численной методики и достоверности полученных результатов проведены экспериментальные исследования на специально сконструированных для этих целей моделях гибких упругих элементов. Экспериментальные результаты достаточно хорошо согласуются с численными данными, что свидетельствует о достоверности результатов моделирования нелинейного поведения манометрических пружин при больших перемещениях.

Шестая глава посвящена вопросам расчета и проектирования перспективных упругих элементов исполнительных устройств. Проведено численное исследование существующих трубчатых манометрических элементов. Получены нелинейные решения для элементов, которые в настоящее время используются в технике и деформируются в области малой нелинейности.

Выполнен расчет гибкого элемента аварийной сигнализации с различной формой поперечного сечения. В качестве расчетной схемы использовалась стержневая модель, изображенная на рис. 4. Основные

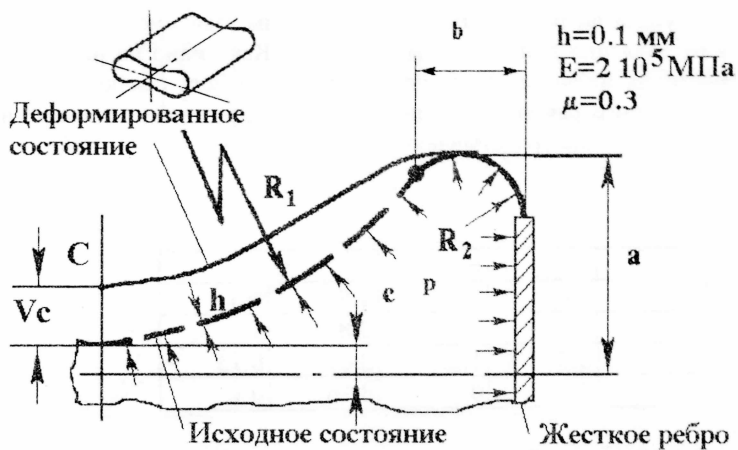


Рис. 4. Расчетная схема аварийного переключателя

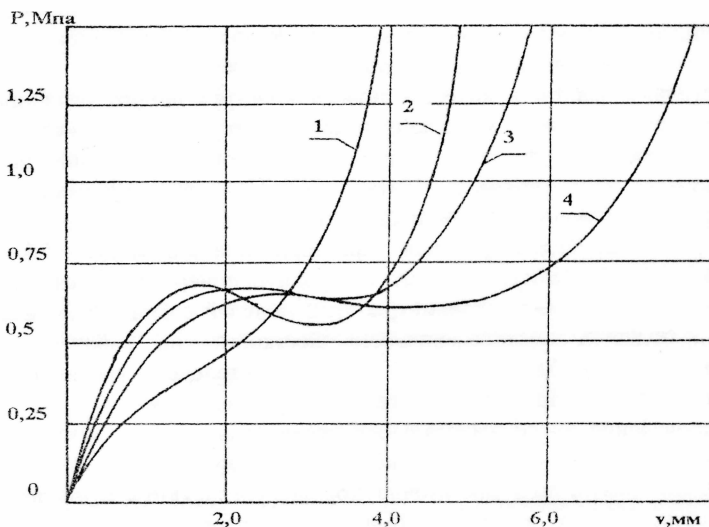


Рис. 5. Характеристики $v=v(p)$ аварийного переключателя при различных геометрических параметрах

геометрические параметры исходных расчетных элементов приведены в таблице 2 в миллиметрах.

По результатам расчета на рис. 5 построены зависимости прогиба в центре v от давления для расчетных моделей. Как видно из рисунка на характеристиках имеются зоны перескоков. Область скачкообразного перехода из одного равновесного положения в другое обеспечивает необходимое мгновенное срабатывание переключателя.

Таблица 2

N	a	b	R_1	R_2
1	2.0	2.56	4.65	1.5
2	2.5	1.71	6.85	1.0
3	3.0	1.28	8.81	0.75
4	4.0	0.80	3.76	0.4

Практический интерес представляет разработка перспективных трубчатых манометрических элементов, для которых переход из исходного положения в рабочее и обратно осуществляется за счет небольшого изменения внутреннего давления, что позволит увеличить быстродействие устройства и снизит энергоемкость. В работе выполнены численные исследования перспективных трубчатых манометрических элементов с различной формой поперечного сечения.

В настоящей работе в качестве нового конструктивного решения предлагается использовать мембранную перегородку для реализации больших перемещений. Влияние формы поперечного сечения на рабочие характеристики гибких трубчатых элементов, в поперечном сечении которых установлены мембранные перегородки, показано на рис.6. На рис. 6 приведена рабочая характеристика для модели 2А, которая отличается от модели 2 тем, что радиус поперечного сечения равен $R_2 = 30$ мм, остальные параметры этих моделей совпадают. Для модели 3 наблюдается заметное снижение жесткости, на рабочей характеристике имеется область, в которой незначительное увеличение внутреннего давления приводит к большим перемещениям.

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен экспериментальный образец гибкого трубчатого элемента 3. Экспериментальные результаты достаточно хорошо согласуются с численными данными. В ходе экспериментальных исследований в процессе деформирования реализуется дискретное срабатывание образца. В процессе численного исследования получен ряд рабочих характеристик, в том числе и с зоной перескока. В результате экспериментальных иссле-

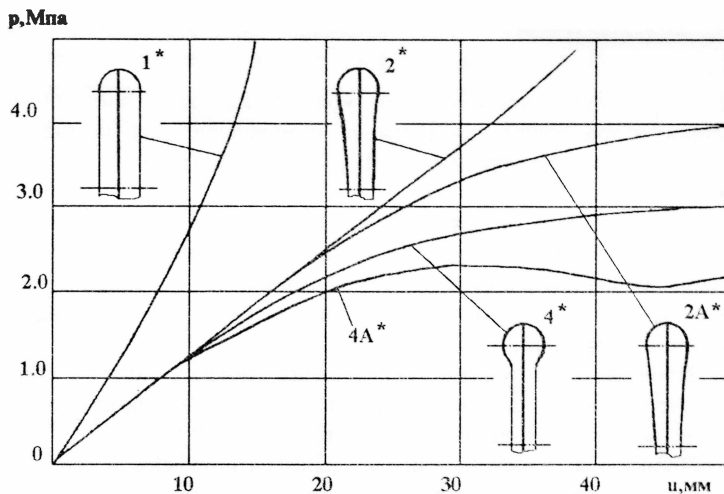


Рис. 6. Характеристики гибких манометрических элементов с внутренней мембранной перегородкой

дований получен скачкообразный переход, обеспечивающий дискретное срабатывание элемента.

Разработанная методика расчета позволяет получать рабочую характеристику гибкого трубчатого манометрического элемента, анализировать напряженное и деформированное состояние элемента на каждом шаге, по имеющимся результатам расчета можно оценить перемещения в окружном направлении, а также исследовать влияние различных параметров на характер деформирования гибких трубчатых манометрических элементов.

Результаты проведенных численных исследований позволили выработать рекомендации по выбору рациональных параметров при проектировании гибких трубчатых манометрических элементов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

1. Проведен анализ состояния актуальной проблемы, связанной с расчетом и проектированием существующих и перспективных упругих трубчатых манометрических элементов, используемых в современных технических устройствах.

2. Разработаны математическая модель, алгоритм численного исследования и прикладное программное обеспечение для выполнения расчетов процессов нелинейного деформирования гибких упругих элементов.

3. Достоверность результатов, получаемых по предлагаемой методике с помощью разработанного пакета прикладных программ, подтверждена экспериментальными исследованиями. Эффективность и точность оценена посредством численного тестирования и сравнения с результатами других авторов.

4. Проведены численные исследования гибких упругих стержневых элементов с целью анализа влияния комплекса внешних параметров на процесс нелинейного деформирования.

5. Проведены численные исследования и получены новые результаты, касающиеся процесса нелинейного деформирования гибких трубчатых манометрических элементов. Исследовано влияние формы поперечного сечения на характер деформирования, а так же ряда конструктивных решений (в частности, внутренней мембранной перегородки).

6. Даны рекомендации по выбору геометрических параметров гибкого трубчатого элемента с целью реализации в процессе деформирования скачкообразного перехода из исходного положения и обратно при незначительном изменении внутреннего давления.

7. По результатам работы разработан пакета прикладных программ для расчетов и проектирования гибких трубчатых манометрических элементов.

8. Разработанная методика численного исследования процессов нелинейного деформирования гибких упругих элементов с использованием пакета прикладных программ внедрена в ОАО "Калугапутьмаш".

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Дзюбан О.Л. Численное исследование закритического поведения гибких упругих элементов, используемых в конструкциях контактных устройств // Автоматизация исследований, проектирования и испытаний сложных технических систем: Тез. докл. Всероссийской научно-технической конф.- Калуга, 1993. - С.76.

2. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О. Упруго-деформирующиеся нелинейные элементы в вакуумной технике // Автоматизация исследования, проектирования и испытаний сложных технических систем и технологических процессов: Тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции. - Калуга, 1994. - С.83.

3. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. Динамика, прочность и устойчивость сложных оболочечных конструкций в машиностроении // Актуальные проблемы фундаментальных наук: Тр. второй Международной научно-технической конференции. - Москва, 1994. - Т.2, ч.2. - С.76.

4. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О. Численное исследование закритического поведения гибких упругих элементов, используемых в конструкциях контактных устройств // Тр. МГТУ. - 1995. - N566. Математическое моделирование сложных технических систем. - С.70-77.

5. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О. Закритическое поведение упругих элементов контактных устройств при эксцентричном нагружении // Тр. МГТУ. - 1996. - N 568. Математическое моделирование сложных технических систем. - С.43 - 50.

6. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О. Нелинейные гибкие элементы в вакуумной технике и технологии // Тр. МГТУ. - 1996. - N 568. Математическое моделирование сложных технических систем. - С.51 - 62.

7. Барышникова О.О. Численное моделирование больших перемещений пружины Бурдона // Международная научно-техническая конференция, посвященная 165-летию МГТУ им. Н.Э.Баумана: Тез. докл.- Москва, 1995. - С.118.

8. Барышникова О.О. Нелинейные гибкие элементы в вакуумной технике // Молодежь и наука - третье тысячелетие: Тез. докл. Международного научного конгресса студентов, аспирантов и молодых ученых. - Москва, 1996. - С. 114.

9. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О. Многопараметрический подход к исследованию сложных процессов деформирования гибких элементов // Тр. МГТУ. - 1996. - N 570. Математическое моделирование сложных технических систем. - С.31 - 39.

10. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О. Алгоритмы численного исследования процессов нелинейного деформирования многопараметрических систем // Тр. МГТУ. - 1996. - N 570. Математическое моделирование сложных технических систем. - С. 40 - 57.

11. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О. Приближенное математическое моделирование нелинейных упругих трубчатых пружин // Международная конференция по теории приближений: Тез. докл.- Калуга, 1996. - С.65-66.

12. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О. Исследование нелинейных характеристик упругих элементов контактных устройств, использующих явление “перескока” // Труды XVII Международной конференции по теории оболочек и пластин. - Казань, 1996.- Т.1. - С.179-184.

Автор:



Подписано к печати 12.05.97 г. Заказ 118.
Объем 1,9 л.д. Тир. 100 экз.

Типография МГТУ