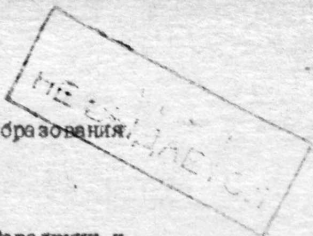


М 464891

Министерство высшего и среднего специального образования
С С С Р



Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ОСИПОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

УДК 539.374;539.376

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЁТА НЕСТАБИЛЬНОСТИ
ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛЬФОННОГО И
МЕМБРАННОГО ТИПА

01.02.06 - Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище
им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Л.Е. АНДРЕЕВА

Официальные оппоненты - член-корреспондент АН СССР
В.И.ФЕОДОСЬЕВ

- кандидат технических наук,
доцент И.П. СУХАРЕВ

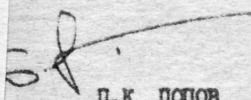
Ведущее предприятие - ГосНИИ теплоэнергетического
приборостроения (г. Москва)

Защита состоится "_____" _____ 1987г. в _____ часов
на заседании специализированного Совета К053.15.11 "Машиностро-
ение" МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бау-
манская ул., дом 5.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные пе-
чатью учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя
учёного секретаря специализированного Совета "Машиностроение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ.

_____ 1987 г.


П.К. ПОПОВ

И.Оп.л., тир. 100 экз., зак 664

на

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Рост эффективности использования измерительной техники в решении различных народнохозяйственных задач связан с дальнейшим повышением требований к надёжности её элементной базы. Принципиальная роль принадлежит при этом первичным преобразователям измеряемых величин — чувствительным элементам.

Одним из основных качественных показателей, определяющих метрологическую надёжность чувствительных элементов, является стабильность их рабочих характеристик в период эксплуатации.

Настоящая работа посвящена разработке методов расчёта нестабильности характеристик упругих чувствительных элементов (УЧЭ) диффузионного и мембранного типа. Опыт эксплуатации этих элементов в системах, контролирующим состояние сред с высокими термодинамическими параметрами, приводит к заключению, что определяющим фактором нестабильности характеристик УЧЭ в указанных условиях является ползучесть материала — развитие необратимой деформации нелинейно-вязкого типа. Накопление во времени деформаций ползучести влечёт за собой изменение начальной геометрии УЧЭ, перераспределение действующих в нём напряжений и, как следствие, изменение его метрологических свойств.

15678996
15678996

Это выражается в наблюдаемом смещении нуля характеристики УЧЭ, изменении функции нелинейности и коэффициента средней чувствительности по контролируемой величине. Необратимые вариации метрологических параметров УЧЭ приводят, в свою очередь, к появлению систематической погрешности измерительной системы.

Особенно заметна роль ползучести в случае элементов высоких классов точности. При этом реологические процессы в материале УЧЭ могут быть причиной выхода его рабочих характеристик из поля допуска даже при эксплуатации в области умеренных нагрузок и температур. Типичным примером таким прецизионных УЧЭ являются anerоиды барометрических высотомеров, входящих в состав бортовых пилотажно-навигационных комплексов летательных аппаратов. Класс точности этих чувствительных элементов, определяемый сотыми процента, должен гарантированно поддерживаться на протяжении нескольких десятков тысяч часов



эксплуатации в условиях непрерывного действия рабочих нагрузок, в связи с чем вопросы стабильности УЧЗ выдвигаются на первый план.

Современные технические требования к элементам рассматриваемого типа во многих случаях формулируются с расчётом на ещё более длительный срок службы изделий (сотни тысяч часов) и содержат, в связи с этим, данные, в том или ином виде определяющие метрологическую надёжность УЧЗ. С другой стороны, упругие элементы всё чаще работают в экстремальных условиях, при повышенных силовых и температурных нагрузках. Всё это делает задачу прогнозирования метрологических свойств сильфонных и мембранных УЧЗ весьма актуальной.

Вопросы влияния неупругих деформаций на рабочие напряжения и метрологические характеристики УЧЗ существенны и с технологической точки зрения, поскольку предэксплуатационная механическая стабилизация готовых УЧЗ, в процессе которой они приспособляются к заданным рабочим нагрузкам, в общем случае сопровождается развитием малых деформаций пластичности и ползучести материала. Таким образом, полный анализ метрологической стабильности рассматриваемых УЧЗ должен основываться на последовательном изучении эффектов пластичности и начальной ползучести материала УЧЗ на этапе стабилизации и остаточной ползучести в эксплуатационный период.

Целью исследования является разработка теоретических и экспериментальных методов, позволяющих анализировать эффекты малых деформаций пластичности и ползучести в упругих элементах сильфонного и мембранного типа и их влияние на рабочие напряжения и метрологические характеристики УЧЗ.

Методы исследования. Теоретический анализ полей малых неупругих деформаций и соответствующих вариаций характеристик УЧЗ основан на численном решении задачи геометрически нелинейного прогиба тонкостенной замкнутой оболочки вращения при нагружении, разгрузке и в условиях стационарного действия давления и осевой силы с использованием методов деформационной теории пластичности и теории течения при ползучести. Определение механических постоянных, характеризующих указание неупругие свойства материала УЧЗ, производится путём обработки результатов релаксационных испытаний плоских образцов по методике, основанной на линейной дифференциальной зависимости

изохронных характеристик неупругой деформации материала от соответствующих характеристик относительной остаточной кризисны образцов.

Предлагаемый в работе метод прогнозирования метрологических свойств УЧЗ в условиях ползучести подвергнут экспериментальной проверке путём сопоставления результатов теоретического расчёта вариаций параметров характеристики типового мембранного чувствительного элемента (анероида) при постоянном внешнем давлении с опытными данными по изменению характеристик anerоидов в процессе вылежки.

На защиту выносятся:

1) Методика и программная реализация численного анализа эффектов пластичности и ползучести в материале УЧЗ сильфонного и мембранного типа и их влияния на напряжённое состояние и метрологические характеристики УЧЗ;

2) Экспериментально-расчётный метод определения постоянных пластичности и ползучести листовых пружинных материалов и его программное обеспечение для ЭВМ;

3) Результаты исследования на основе предлагаемых методов свойств пластичности и ползучести пружинного сплава БЧТ-I, 9Мг при нормальной температуре и анализа неустойчивости характеристик типовых образцов УЧЗ сильфонного и мембранного типа из указанного материала в схемах силовой компенсации и прямого измерения.

Вопросы метрологической неустойчивости рассматриваемых оболочечных УЧЗ в указанной постановке ранее не изучались и полученные результаты являются новыми.

Научная достоверность результатов базируется на всестороннем предварительном анализе и последующей проверке условий применимости используемых методов описания деформаций пластичности и ползучести материала УЧЗ, тщательной разработке алгоритмов и программ и подтверждается удовлетворительным согласованием результатов теоретического расчёта с полученными экспериментальными данными.

Практическая ценность работы определяется:

1) Наличием отлаженного комплекса программ для ЭВМ, реализующих разработанный алгоритм расчёта неустойчивости харак-

теристик сильфонных и мембранных УЧЗ с начальными данными, описывающими исходную геометрию УЧЗ и свойства материала в форме, удобной для практических приложений;

2) Наличием отлаженных программ обработки на ЭВМ результатов релаксационных испытаний плоских образцов для получения констант пластичности и ползучести материала;

3) Наличием результатов конкретного использования разработанных методов для исследования свойств пластичности и ползучести пружинного сплава БНТ-I, 9Мг в термоупрочнённом состоянии и для анализа неустойчивости метрологических свойств УЧЗ в различных схемах измерения.

Результаты разработок, оформленные в виде методик, руководящих технических материалов и программ для ЭВМ, используются при расчёте и проектировании упругих чувствительных элементов сильфонного и мембранного типа на предприятиях Минвиапрома и Минприбора СССР.

Апробация. Материалы работы докладывались и обсуждались на II Республиканской научно-технической конференции "Проблемы развития упругих чувствительных элементов приборов" (Казань, 1977 г.), Всесоюзной межотраслевой конференции по проблемам проектирования и производства гибких трубопроводов и сильфонов" (Уфа, 1982 г.), III Всесоюзной конференции по расчётам на прочность металлургических машин (Жданов, 1985 г.), а также на объединённом научном семинаре кафедры "Сопротивление материалов, динамика и прочность машин" МВТУ им. Н.Э. Баумана (1985 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в четырёх статьях и пяти научно-технических отчётах по темам, выполненным в соответствии с "Координационным планом по проблемам автоматизированного проектирования в области машиностроения на 1978-1982 гг." и приказом Минвуза СССР № 135 от 16 октября 1980 года.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка литературы из 98 наименований и приложения; содержит 110 страниц основного машинописного текста, 65 рисунков и 9 таблиц.

Введение. Практика эксплуатации упругих чувствительных элементов и опыт исследования стабильности их метрологических свойств при длительном воздействии рабочих нагрузок свидетельствует о том, что изменение характеристик УЧЭ в этих условиях связано с протекающими в микроструктуре материала диссипативными процессами, приводящими к накоплению необратимых макродеформаций и перераспределению внутренних напряжений УЧЭ. Для элементов сильфонного и мембранного типа количественный анализ явления ползучести и его влияния на метрологические характеристики УЧЭ может быть выполнен средствами нелинейной механики тонкостенных оболочек при феноменологическом описании эффектов неупругой деформации материала. Корректная постановка задачи стабильности требует последовательного рассмотрения истории неупругих деформаций материала от момента изготовления УЧЭ, куда включаются как предэксплуатационная стабилизирующая обработка УЧЭ, сопровождаемая развитием малых деформаций пластичности и начальной ползучести материала, так и последующий период эксплуатационной ползучести, обуславливающей нестабильность метрологических свойств УЧЭ.

В первом разделе содержится обзор работ, посвящённых геометрически и физически нелинейным задачам механики тонкостенных конструкций. Метрологическая функция исследуемых упругих элементов предъявляет повышенные требования к точности решения соответствующих прикладных задач. При этом важную роль играет выбор исходных физических соотношений, отвечающих феноменологическому описанию деформаций пластичности и ползучести исследуемых оболочечных УЧЭ. В обзоре подробно рассматриваются, в частности, предложенные различными авторами варианты зависимостей между обобщёнными геометрическими и силовыми переменными теории тонкостенных оболочек,

соответствующие применяемым законам пластичности и ползучести материала. Отмечается, что точность используемых в приложениях обобщенных соотношений существенно зависит от вида напряженного состояния элемента оболочки.

При всё возрастающем объеме исследований на базе современной вычислительной техники определяющая роль в решении прикладных задач теории оболочек принадлежит численным методам. Ориентация на ЭВМ, как средство внедрения расчетной методики в практику проектирования и исследования свойств УЧЗ, позволяет исходить из постановки задачи стабильности УЧЗ в деформациях и напряжениях, используя переход к обобщенным переменным как способ понижения размерности краевых задач. В приводимом обзоре отражены характерные особенности основных алгоритмических процедур, применяемых при решении краевых задач нелинейного прогиба оболочек вращения, дается оценка их эффективности в сочетании с методом упругих решений для анализа физически нелинейных деформаций материала.

Во втором разделе излагаются теоретические основы методики исследования неустойчивости метрологических характеристик УЧЗ сильфонного и мембранного типа в условиях проявления свойств пластичности и ползучести материала. Предварительно обосновывается расчетная модель УЧЗ как замкнутой круговой оболочки составного профиля с переменной толщиной стенки, рассматриваются типичные варианты нагружения исследуемых УЧЗ. Исходя из анализа процесса деформации оболочки при действии осесимметричной нагрузки делается предварительный вывод о возможности описания эффектов неупругого поведения материала УЧЗ с помощью основных соотношений деформационного типа.

Система дифференциальных уравнений краевой задачи для рассматриваемой оболочки получается из условий равновесия силовых факторов и совместности мембранных деформаций с использованием обобщенных физических зависимостей для элемента оболочки. Она имеет вид:

$$\begin{aligned} \chi'' + F_1 \chi' + F_2 + F_3 \psi + F_4 q + \Omega_1 &= 0 \\ \psi'' + G_1 \psi' + G_2 + G_3 \psi + G_4 p + G_5 q + \Omega_2 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где () — производная по безразмерной длине ζ меридиана,

$p(\zeta), q(\zeta)$ — безразмерные функции, линейно зависящие от параметров P (давление) и Q (осевая сила) внешней нагрузки. Основными неизвестными в (I) являются: $\chi(\zeta)$ — функция угла поворота нормали к меридиану вследствие деформации, $\psi(\zeta)$ — безразмерная функция радиального усилия в окружном сечении оболочки.

Вследствие нелинейности прогибсов рассматриваемой оболочки коэффициенты $F_1, \dots, F_4$ и $G_1, \dots, G_5$ системы (I) зависят от функции $\chi(\zeta)$. Коэффициенты $\Omega_1(\zeta), \Omega_2(\zeta)$, в общем случае неизвестные, являются интегральными характеристиками распределения неупругих деформаций материала по толщине оболочки и отражают физическую нелинейность задачи.

Краевая задача для системы (I) формулируется из условий закрепления полной оболочки, а также условий сопряжения её составных частей, соответствующих гладким участкам профиля УЧЗ. Типичными для исследуемых элементов вариантами общих граничных условий являются условия жёсткого или скользящего закрепления внутреннего и наружного края. Граничные условия в точках сопряжения получаются на основе требований непрерывности функций радиального перемещения и изгибающего момента в окружном сечении оболочки.

Для приближённого решения сформулированной краевой задачи используется процедура её последовательной линеаризации по методу Ньютона-Канторовича. В связи с относительной малостью неупругой составляющей деформации процесс последовательных приближений осуществляется в два этапа.

На первом этапе достигается сходимость решения краевой задачи при текущих функциях внешней нагрузки $p(\zeta)$ и $q(\zeta)$ и фиксированных значениях коэффициентов $\Omega_1(\zeta), \Omega_2(\zeta)$, известных из решения задачи на предыдущем этапе истории нагружения. При этом находится главная часть упругих компонент деформации от текущих нагрузок.

На втором этапе последовательные приближения по Ньютону-Канторовичу осуществляются в рамках метода упругих решений, что позволяет найти распределение дополнительных неупругих деформаций, обусловленных действием текущих нагрузок и новые значения коэффициентов $\Omega_1(\zeta), \Omega_2(\zeta)$. При этом несколько уточняются упругие компоненты деформации, найденные на первом этапе решения.

Реализация изложенной процедуры решения осуществляется на основе сеточной аппроксимации функций и уравнений. Линейные краевые задачи, возникающие при использовании метода Ньютона-Канторовича, с помощью операторов конечно-разностного дифференцирования сводятся к системам линейных алгебраических уравнений относительно значений искомых функций в узлах расчётной сетки вдоль профиля оболочки. Для их решения используется метод прогонки. Нелинейные задачи определения упругой и неупругой составляющих полной деформации, а также напряжений в узлах расчётной сетки решаются на основе метода Ньютона.

В заключительной части раздела приведены формулы, используемые для расчёта прогибов и напряжений оболочки по найденным в результате решения краевой задачи основным функциям $\delta(\xi)$, $\psi(\xi)$ и составляющим полной неупругой деформации.

Развёрнутое описание структуры и порядка работы фортран-программы STAMB, реализующей изложенный алгоритм, а также варианты начальных данных и полный текст программы содержатся в приложении к диссертации.

В третьем разделе описана методика исследования свойств пластичности и ползучести и определения соответствующих механических констант пружинных материалов путём испытаний плоских образцов на релаксацию в состоянии изгиба. Указанный вид испытаний широко используется в практике материаловедения для сравнения релаксационной стойкости листовых материалов, отличаясь от других известных методов значительной простотой оборудования и постановки эксперимента. В рассматриваемом случае к достоинствам этого метода относится и то, что образцы, также как и исследуемые УЧЗ, изготавливаются из листового проката.

Вывод зависимости, используемой в работе для перехода от характеристик остаточного прогиба образцов к характеристикам неупругой деформации материала, основан на допущениях, что материал образца однороден и одинаково сопротивляется растяжению и сжатию. При этом для изохронных характеристик $\omega(\varepsilon, t)$ и $\Omega(\varepsilon, t)$, определяемых отношением остаточной деформации образца к предварительной деформации ε ,

которая задаётся соответственно путём растяжения или изгиба (в последнем случае $\varepsilon = \alpha h / 2$, где α - кривизна, h - толщина образца) имеет место линейная дифференциальная зависимость:

$$\omega(\varepsilon, t) = \Omega(\varepsilon, t) - \frac{1}{3} \varepsilon \frac{d\Omega}{d\varepsilon} \quad (2)$$

Функции $\Omega(\varepsilon, t)$ и $\omega(\varepsilon, t)$ разделяются на независимые от времени пластические составляющие $\Omega^p(\varepsilon)$, $\omega^p(\varepsilon)$ и переменные составляющие ползучести $\Omega^c(\varepsilon, t)$, $\omega^c(\varepsilon, t)$. Соотношение (2) используется отдельно для каждой из указанных составляющих.

Далее в работе приведено описание экспериментальной методики и результатов релаксационных испытаний плоских образцов пружинного сплава БНТ-1,9Мг при нормальной температуре в течение 1000 часов. Обработка полученных опытных данных на основе зависимости (2) производилась по специальной расчётной программе, использующей аппроксимацию экспериментальных характеристик остаточных деформаций с помощью степенных функций от ε и t по методу наименьших квадратов в логарифмических координатах. В частности, исходная опытная характеристика $\Omega^p(\varepsilon)$ и изохронные характеристики $\Omega^c(\varepsilon, t)$ приближались выражениями вида $A\varepsilon^B$. В этом приближении характеристика пластической деформации материала $\omega^p(\varepsilon)$ и изохронные характеристики деформации ползучести $\omega^c(\varepsilon, t)$, согласно (2), отличаются от соответствующих характеристик остаточных деформаций образца $\Omega^p(\varepsilon)$ и $\Omega^c(\varepsilon, t)$ множителями $(1 + 1/3)$.

При дальнейшей обработке полученной совокупности характеристик пластичности и ползучести материала предполагалось, что в процессе испытаний в образце, имеющем номинальную длину $L=100$ мм, ширину $b=5$ мм и толщину $h=0,3$ мм, при заневоливании реализовался цилиндрический изгиб, так что основной объём образца находился в плоском деформированном состоянии. В этом случае функция интенсивности напряжений $\Phi(\sigma_i)$, фигурирующая в соотношениях деформационного закона пластичности как коэффициент пропорциональности между тензором пластической деформации и девиатором напряжений, определяется с помощью характеристики $\omega^p(\varepsilon)$ в параметрическом виде:

$$\Phi = (1 - \nu^2) \omega^p / [(1 - \omega^p)(1 - \nu/2)] \quad (3)$$

$$\bar{\sigma}_i = (1 - \nu + \nu^2)^{1/2} \cdot \bar{\sigma} \quad (4)$$

Нормальное напряжение $\bar{\sigma}$ в поперечном сечении образца при начальном нагружении зависит от продольной деформации ε следующим образом:

$$\bar{\sigma} = E \varepsilon (1 - \omega^p) / (1 - \nu^2) \quad (5)$$

Дискретная зависимость $\Phi(\bar{\sigma}_i)$, полученная согласно (3) - (5) для исходного ряда значений деформации заневоливания образцов, аппроксимировалась функцией вида $B_p(\bar{\sigma}_i - \bar{\sigma})^m$

Обработка серии изохронных характеристик $\omega^c(\varepsilon, t)$ деформации ползучести основывалась на соотношениях теории течения в рамках предположений о подобии кривых ползучести и степенной зависимости скорости ползучести от напряжений. Показатель ползучести и ряд значений функции временного упрочнения находились путём совместной степенной интерполяции (с единым общим показателем) изохронных зависимостей интенсивности скоростей деформации от интенсивности напряжений.

Для последующей аппроксимации функции временного упрочнения использовалось степенное выражение (6), хорошо отражающее специфику упрочнения пружинного материала в процессе ползучести при нормальной температуре:

$$\tau(t) = B_c (1 + t/t_0)^p \quad (6)$$

Параметры указанных степенных аппроксимаций для функций $\Phi(\bar{\sigma}_i)$ и $\tau(t)$, включая показатель ползучести p , образуют группу механических постоянных, определяющих свойства пластичности и ползучести материала применительно к изложенной в разделе 2 методике численного анализа неустойчивости характеристик УЧЗ. В приложении к диссертации содержится описание и текст фортран-программы STSP для обработки на ЭВМ экспериментальных данных по релаксации плоских образцов в соответствии с изложенной методикой. Результаты использования программы STSP для определения констант пластичности и ползучести пружинного сплава БНТ-1,9Мг на основе приводимых опытных данных представлены в таблице в конце раздела.

Четвёртый раздел диссертации посвящён применению разработанных методов к изучению метрологической неустойчивости УЧЭ. Объектами исследования являются сильфонный (СЧЭ) и мембранный (МЧЭ) чувствительные элементы, выполненные из сплава БНТ-I, 9Мг. СЧЭ рассматривается в схеме силовой компенсации, МЧЭ - в схеме прямого измерения.

Предварительно на основе созданной расчётной методики в рамках пружинной модели анализируется кинетика напряжённого состояния материала рассматриваемых УЧЭ в точках наибольшей интенсивности напряжений в зависимости от нагрузки. В частности, для СЧЭ приводятся графики зависимости интенсивности напряжений и параметра Надаи-Лоде χ_g на внутренних вершинах гофр от наружного давления в интервале от минимума рабочей нагрузки до давления опрессовки при стабилизации. Аналогичные данные в случае МЧЭ получены по результатам расчёта напряжённого состояния элемента при независимом действии давления и осевой силы в диапазонах, по крайней мере вдвое перекрывающих интервалы соответствующих нагрузок стабилизации.

Из приводимых данных следует, что локальные процессы нагружения материала рассматриваемых УЧЭ за пределами упругости характеризуются незначительными изменениями вида напряжённого состояния. Это подтверждает предварительные выводы о возможности описания пластических эффектов при стабилизации исследуемых УЧЭ с помощью основных соотношений деформационного типа и о применимости концепции временного упрочнения при анализе неустойчивости их характеристик в условиях ползучести. Для оценки роли пластических деформаций выделенные характеристики напряжённого состояния УЧЭ рассчитаны также с учётом реальных характеристик упрочнения сплава БНТ-I, 9Мг, полученных при обработке данных по релаксации напряжений в плоских образцах в состоянии изгиба. Результаты расчёта представлены на тех же графиках.

Далее упругопластическое решение используется для анализа номинальных режимов механической стабилизации исследуемых чувствительных элементов. С точки зрения метрологической неустойчивости УЧЭ в эксплуатационный период существенный интерес представляет, в частности, влияние начальных перегрузок

УЧЗ на распределение его рабочих напряжений и упрочнение материала.

Прежде всего, при стабилизации реализуется приспособляемость УЧЗ к требуемым рабочим нагрузкам, что обеспечивает отсутствие повторных пластических деформаций материала в эксплуатационный период. С этой точки зрения эффективность стабилизации оценивается с помощью коэффициента запаса по упругости Π_y , определяемого в общем случае наименьшей величиной локального отношения $\sqrt{\epsilon}$ предела упругости материала к максимальной интенсивности рабочих напряжений УЧЗ в соответствующей точке.

При анализе механической стабилизации СЧЗ, датчика абсолютного наружного давления в диапазоне $0,02 + 0,12$ МПа, рассчитывались характеристики напряжённого состояния при максимальной рабочей нагрузке до и после кратковременной стабилизирующей опрессовки давлением $0,26$ МПа. Полученные результаты представлены эпорами по длине полуволны силфона мембранных и изгибных составляющих радиальной σ_r и окружной σ_ϕ компонент напряжений, а также полных напряжений σ_s, σ_ϕ у внутренней поверхности и интенсивности σ_i напряжений у наружной и внутренней поверхности СЧЗ.

Из приводимых данных следует, в частности, что абсолютный максимум интенсивности рабочих напряжений СЧЗ, достигаемый на внутренних вершинах гофр, снижается в результате предварительной опрессовки с 820 МПа до 615 МПа, т.е. на 25% -тов. На наружных вершинах гофр аналогичный эффект составляет $\sim 8\%$ -тов.

В силу нелинейности рассматриваемого УЧЗ величина снижения рабочих напряжений вследствие начальной перегрузки не является постоянной во всём диапазоне рабочего давления. Это иллюстрируется в работе эпорами изменения компонент рабочих напряжений у внутренней поверхности СЧЗ в результате стабилизации, рассчитанными как для максимального, так и для минимального рабочего давления. Несмотря на то, что СЧЗ работает в схеме силовой компенсации осевого перемещения, роль нелинейности достаточно заметна.

На основе модели изотропного упрочнения, согласно которой повышение начального предела упругости материала определяется величиной достигнутой при нагружении интенсивности напряжений,

для точек наружной и внутренней поверхности ЧЗ построены кривые распределения величины ν , из которых найдено, что коэффициент запаса по упругости после стабилизации ЧЗ составляет $\nu = 1,87$ по сравнению с $\nu = 1,17$ до стабилизации. Таким образом, стабилизация более, чем на половину повышает значение коэффициента запаса ν .

Для исследуемого мембранного элемента, применяемого в анероидах барометрических высотомеров с рабочим диапазоном давлений $0,01182 \pm 0,11024$ МПа, аналогичный анализ напряжённого состояния на верхнем пределе нагрузки показывает, что в исходном состоянии МЧЗ величина $\nu < 1$, так что метрологические функции элемента могут быть обеспечены только в результате его стабилизирующей обработки.

Механическая стабилизация анероида производится непосредственно после вакуумирования и включает в себя: 1) кратковременное воздействие осевой сжимающей силы $Q=60$ Н; 2) опрессовку $P=0,12236$ МПа (900 мм.рт.ст.) в течение трёх часов. Расчётный анализ первого этапа стабилизации приводит к выводу, что стабилизирующий эффект приложения силы связан с наличием компоненты внешнего давления, ибо нагружение фактически является комбинированным. Предварительное нагружение МЧЗ изолированной осевой силой не позволяет обеспечить $\nu > 1$ в силу ограничений на величину силы по условию прочности материала.

Сравнение эффективности комбинированного нагружения с опрессовкой по коэффициенту ν показывает, что в рамках естественного ограничения на величину встречного перемещения жёстких центров анероида опрессовка позволяет получить $\nu = 1,21$ по сравнению с $\nu = 1,09$ в результате действия силы.

Умеренная опрессовка, используемая по указанному нормативному режиму в качестве нагрузки длительного действия на втором этапе стабилизации, как показывает расчёт, не вызывает дополнительного пластического эффекта. Однако накапливаемая в течение 3-х часов деформация ползучести в сумме с предшествующей пластической деформацией заметно влияет на рабочие напряжения МЧЗ. Например, величина снижения абсолютного максимума интенсивности рабочих напряжений достигает 10-15-тов.

При переходе к анализу метрологической неустойчивости исследуемых ЧЗ на примере характеристики анероида по высоте стандартной атмосферы дается вывод линеаризованного выражения

для систематической ошибки измерения через вариации основных параметров характеристики: положение нуля U , средней чувствительности $S_{\text{ср}}$ и функции нелинейности $N_{\text{нл}}(h)$. Вариации указанных параметров для характеристик СЧЭ и МЧЭ рассмотрены как в процессе предварительной стабилизации, так и при последующем длительном воздействии рабочей нагрузки.

Для СЧЭ найдено, что в результате начальной опрессовки относительное изменение параметров средней чувствительности $S_{\text{ср}}$ и нелинейности $\eta_{\text{нл}} = \max N_{\text{нл}}(P)$ определяется соответственно величинами $-0,1\%$ и $1,6\%$. Влияния ползучести в течение 1000-часового периода стационарного действия максимального рабочего давления на характеристику СЧЭ в пределах используемой точности расчёта метрологических параметров не обнаружено.

В случае МЧЭ указанные параметры чувствительности и нелинейности рассчитывались для характеристики хода по высоте стандартной атмосферы. Их относительные изменения в результате стабилизации составляют: $-1,69\%$ и $19,18\%$. Соответствующие вариации вследствие ползучести за 1000 часов после стабилизации при наибольшем рабочем давлении равны: $\delta S_{\text{ср}}/S_{\text{ср}} = -0,16\%$, $\delta \eta_{\text{нл}}/\eta_{\text{нл}} = 2,70\%$. Таким образом, в схеме прямого измерения, в отличие от схемы силовой компенсации, неупругие эффекты весьма заметно отражаются на характеристике УЧЭ.

В связи с этим anerоиды высотомеров, в которых применяется исследуемый МЧЭ, после стабилизации проходят контрольную выдержку в течение 1 года. Элемент считается пригодным к эксплуатации, если смещение нуля характеристики $w(h)$ в указанный период не превосходит 15 мкм.

Результаты расчёта вариаций основных метрологических параметров МЧЭ в течение контрольного года показывают, что используемый критерий является завышенным: приблизительно на 50 %-тов. Для вариаций параметров чувствительности и нелинейности МЧЭ рассчитаны прогностические значения по годам ресурсного периода (~ 10 лет) соответствующим вариациям контрольного года.

В качестве метода анализа методики к анализу погрешностей в данной системе вследствие неустойчивости свойств элемента, даётся расчёт накопления систематической ошибки высотомера в условиях ползучести anerоида.

В заключение раздела с целью опытной проверки предлагаемых методов анализа неустойчивости характеристик УЧЗ проводится сопоставление расчётных и экспериментальных данных по вариации основных метрологических параметров анерсидов в процессе вылежки, т.е. в условиях ползучести при средней атмосферной нагрузке $P = 0,1$ МПа и нормальной температуре $T = 23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Опытные данные содержат результаты испытаний 4-х партий анерсидов из БНТ-I, 9Мг для различных вариантов их начального нагружения, в том числе: 1) опрессовка $P = 0,12236$ МПа; 2) нагружение осевой силой $S = 60$ Н; 3) последовательное действие осевой силы и опрессовки; 4) отсутствие предварительной нагрузки. Соответствующий расчёт выполнен по результатам определения средних параметров начальной геометрии образцов УЧЗ, проходивших данные испытания, с использованием приведённых в разделе 3 констант пластичности и ползучести БНТ-I, 9Мг при нормальной температуре. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных по изменению средней чувствительности и нелинейности УЧЗ в течение 1000 часов показал их хорошее соответствие, что позволяет сделать вывод о применимости разработанных методов в задачах исследования метрологической надёжности сильфонных и мембранных чувствительных элементов.

ВЫВОДЫ

1. Создана методика теоретического анализа неустойчивости характеристик УЧЗ сильфонного и мембранного типа, основанная на численном решении последовательности геометрически и физически нелинейных задач упругости, пластичности и ползучести тонкостенных осесимметричных оболочек составного профиля.
2. Разработан алгоритм и отлажена программа по расчёту метрологической неустойчивости исследуемых УЧЗ с помощью ЭВМ.
3. Предложена экспериментально-расчётная методика определения механических констант, характеризующих свойства пластичности и ползучести тонколистовых пружинных материалов.
4. Создано программно-алгоритмическое обеспечение расчётной части указанной методики применительно к анализу метрологической неустойчивости исследуемых УЧЗ.
5. По разработанной методике проведены испытания образцов и рассчитаны константы пластичности и ползучести сплава БНТ-I, 9Мг.

6. С использованием полученных данных исследована эффективность нормативных режимов механической стабилизации сильфонного (схема силовой компенсации) и мембранного (схема прямого измерения) чувствительных элементов из сплава БНТ-1, 9Мг.
7. Выполнено исследование неустойчивости характеристик рассматриваемых образцов УЧЗ в условиях ползучести при постоянной внешней нагрузке с учётом предварительной стабилизации. Выявлены особенности влияния неупругих эффектов на метрологические свойства УЧЗ в указанных метрологических схемах.
8. Проведён численный анализ накопления систематической погрешности барометрического высотомера вследствие неустойчивости характеристики анероида.
9. Проведено сопоставление теоретических и экспериментальных данных по вариации характеристик анероидов в условиях длительного нагружения, подтверждающее применимость разработанных методов к анализу метрологической неустойчивости УЧЗ.
10. Результаты разработок внедрены на предприятиях Минавиапрома и Минприбора СССР, используются для создания САПР УЧЗ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих статьях:

1. Андреева Л.Е., Богданова Ю.А., Осипов С.В. Эффекты явления ползучести в мембранах// Приборы и системы управления. -1977.-№7.-С. 21-24.
2. Осипов С.В., Богданова Ю.А., Лешковцев В.Г. К методике построения кривых упрочнения из испытаний на изгиб// Изв. вузов. Машиностроение. -1979.-№ 4.-С. 17-20.
3. Лешковцев В.Г., Осипов С.В., Горячева Л.Н. Определение локальных характеристик релаксации напряжений и ползучести по результатам испытаний на изгиб// Надёжность и ресурс машин и конструкций. Научные труды МЭИ.-1984.-Вып. 26.-С. 101-105.
4. Лешковцев В.Г., Горячева Л.Н., Осипов С.В. Методика исследования релаксационной стойкости тонколистовых пружинных материалов// Зав. лаборатория.-1986.-Т. 52.-С. 74-76.

Даниел