

М165171

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

ПЕТРОВСКИЙ В. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ
СИЛЬФОНОВ В УСЛОВИЯХ СИЛОВОЙ КОМПЕНСАЦИИ

(Специальность 05.025. Динамика и прочность машин)

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
кандидат технических наук доцент Андреева Л. Е.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор В. И. Феодосьев,
кандидат технических наук В. Б. Силкин.

Ведущее предприятие — завод «Манометр», г. Москва.

Автореферат г. 1972 г.

Защита диссертации на заседании комиссии по защите докторской диссертации на кафедре прочности материалов МВТУ им. Н. Э. Баумана, 107005, 2-ая половина 1972 г.

Ваши отзывы и замечания принимаются. Верен-
ные печатать.

С диссертацией ознакомлен и одобряю. МВТУ
им. Н. Э. Баумана.

Ученый секретарь комиссии по защите докторской диссертации кандидат технических наук С. П.

М165171

В приборах давления в качестве упругого чувствительного элемента часто применяются сильфоны. В общем случае сильфон может быть нагружен давлением и силой. Если точка приложения силы не перемещается, выполняется условие силовой компенсации, а сила называется компенсирующей.

В последние годы манометрические приборы высоких классов точности обычно выполняются по схеме силовой компенсации. Отсутствие перемещения чувствительного элемента является одной из причин повышенной точности приборов силовой компенсации по сравнению с теми приборами, где чувствительный элемент совершает ход. Погрешности, вызываемые несовершенством упругих свойств материала (гистерезис, последействие, температурная погрешность, связанная с изменением модуля упругости) в чувствительном элементе силовой компенсации практически не отражаются на точности прибора, а возникающие рабочие напряжения в несколько раз меньше, чем в элементе, совершающем перемещение.

Точность преобразования сильфоном давления в силу определяется свойствами эффективной площади, которая, характеризуя масштаб этого преобразования, зависит от давления. Отсутствие информации об этой зависимости ограничивает точность приборов силовой компенсации в целом. Поэтому задача расчета и исследования эффективной площади сильфонов является важной для приборостроения.

До настоящего времени теоретическое исследование эффективной площади сильфонов не производилось. Этому способствовал тот факт, что было принято считать сильфон геометрически линейным объектом, а эффективную площадь — постоянной величиной. В условиях практики для оценки эффективной площади используются известные эмпирические зависимости, учитывающие только величины наружного и внутреннего радиусов сильфона.

В настоящей работе исследование свойств эффективной площади сильфонов производилось на основе нелинейной теории тонких оболочек вращения. Решение получено численно, различными методами. Исследована зависимость эффективной площади сильфона от геометрии гофров и давления. Рассмотрено влияние монтажных погрешностей на изменение эффективной площади по давлению. Построен инженерный метод расчета сильфонов в условиях силовой

НТБ МГУ им. Н. Э. Баумана



1165171

Петровский В. В. Исследования

● ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

I

М ВТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

компенсации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов; написана на 131 страницах, содержит 67 рисунков и 6 таблиц.

В первой главе изложен краткий обзор расчетных схем сифонов и рассмотрены методы их решения, обсуждены имеющиеся в литературе выражения для расчета эффективной площади и дана общая постановка задачи предполагаемого исследования.

Внедрение в расчетную практику ЭВМ позволило приступить к исследованию сифонов на основе теории тонких оболочек без упрощений геометрического и краевого характера. Сифоны с произвольной геометрией гофра изучались Э.Л.Аксельрадом (1966), Л.Е.Андреевой и Л.Н.Горячевой (1969), Н.М.Савкиным (1969). Нелинейные решения сифонов получены Н.Н.Бабаевым (1943), Э.Л.Аксельрадом (1966), Н.М.Савкиным (1970), М. Homada (1968).

Для расчета эффективной площади сифонов $F_{эф}$ в практике обычно используется эмпирическая зависимость:

$$F_{эф1} = \pi R_{ср}^2, \quad (1)$$

где

$$R_{ср} = \frac{R_H + R_B}{2} - \text{средний радиус сифона.}$$

Реже эффективная площадь оценивается по средней площади экстремальных сечений гофра:

$$F_{эф2} = \frac{\pi}{2} (R_H^2 + R_B^2) \quad (2)$$

Теория кольцевых пластин к расчету эффективной площади применялась В.И.Королевым (1954), Р.В.Exline (1938), S. Takeda (1963), Т. Такеда (1959). Упомянутые зависимости связывают эффективную площадь с наружным и внутренним радиусами сифона. Ими не учитывается форма контура меридиана, в том числе величины радиусов торových участков, и закон изменения толщины стенки вдоль контура меридиана. Предполагается, что эффективная площадь не зависит от давления и от схемы нагружения сифона. Это равноценно принятию допущения о линейности характеристик сифона. Учет всех особенностей геометрии гофра может быть осуществлен принятием расчетной схемы, свободной от подобных упрощений. Исследование такой расчетной схемы в нелинейной постановке возможно только численно. Для контроля точности

счета при численном решении задачи целесообразно выполнять решение разными методами, а не прибегать к принципу Рунге, так как геометрическая нелинейность сильфонов в силовой компенсации проявляется значительно меньше, чем при свободном ходе, а требования к точности счета должны быть высокими. Исследование влияния несовершенств сборки на изменение эффективной площади по давлению требует особого решения. Предполагается, что в естественном состоянии сильфон осесимметричен и все его гофры находятся в одинаковых условиях.

Во второй главе излагаются численные решения сильфона в нелинейной постановке различными методами: вариантом метода последовательных приближений, известным в литературе как метод Ньютона - Канторовича (решение А), с помощью линейной аппроксимации по методу Ньютона (решение Б) и на основе метода В.З.Власова - В.В.Петрова (решение В). Решения строятся исходя из уравнений осесимметричной деформации тонких оболочек вращения при конечных перемещениях *E. Reissner* (1950), которая приводится к безразмерному виду. Форма контура меридиана задается параметрически $\varrho(\xi)$, $\chi(\xi)$, а закон изменения толщины стенки вдоль контура меридиана $h(\xi)$ задается тригонометрическим полиномом:

$$h(\xi) = \sum_0^L C_n \cos n \xi$$

В решении А разрешающие функции x представляются в виде суммы известной главной части решения $\bar{x}$ и малой искомой поправки $\tilde{x}$:

$$x = \bar{x} + \tilde{x} \quad (3)$$

После подстановки (3) в нелинейные уравнения, последние линеаризуются относительно поправок. Предполагается, что нагрузка изменяется пропорционально некоторому целочисленному параметру:

$$P_q^* = \Delta P_q^* \cdot q,$$

где

$$q = \left(\frac{l}{m} \right)$$

На первом этапе нагружения главная часть $\bar{x}$ определяется из линейного решения, на последующих этапах - по экстраполяционной

формуле повышенной точности:

$$x_{q+1}^{(2)} = 3x_q - x_{q-1} - x_q^{(2)}$$

Заменой дифференциальных операций приближенными разностными отношениями приходим с учетом краевых условий к системе линейных алгебраических уравнений высокого порядка, матрица коэффициентов которой имеет ленточный тип. Такая система успешно решается методом прогонки. Процесс уточнения разрешающих функций выполняется по (3) до достижения заданной точности ε :

$$\max |\tilde{x}| \leq \varepsilon$$

В решении Б исходная система записывается в виде эквивалентной нормальной системы, интегрирование которой может быть выполнено любым численным методом, например, методом Рунге - Кутты, обеспечивающим точность счета порядка $(\Delta z)^5$. Решение краевой задачи при заданной нагрузке и указанных краевых условиях будем считать установленным, если начальный вектор

$\bar{y}_n(0)$ обеспечивает выполнение краевых условий в конце интервала интегрирования с заданной точностью. Запишем функциональную связь между начальным $\bar{y}_n(0)$ и конечным $\bar{y}_n(\pi)$ векторами:

$$F[\bar{y}_n(0)] = \bar{y}_n(\pi) \quad (4)$$

Представим вектор $\bar{y}_n(0)$ в виде суммы приближенного значения его $\bar{y}_n^{(0)}(0)$ и малой поправки $\bar{h}_n$:

$$\bar{y}_n(0) = \bar{y}_n^{(0)}(0) + \bar{h}_n, \quad (5)$$

учтем это в (4) и разложим левую часть уравнения (4) по степеням малого параметра $\bar{h}_n$. Ограничиваясь линейными членами разложения, получим выражение для уточнения начального вектора. Для системы четвертого порядка это выражение имеет вид

$$y_{v-1}^{(0)/(\kappa)}(0) = y_{v-1}^{(0)/(\kappa)}(0) - \frac{\begin{vmatrix} \delta & -\gamma \\ -\eta & \alpha \\ \alpha & \gamma \\ \eta & \delta \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \delta & -\gamma \\ -\eta & \alpha \\ \alpha & \gamma \\ \eta & \delta \end{vmatrix}} y_{v-1}^{(0)/(\kappa-1)}(\pi),$$

где

$$v = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix};$$

$$\alpha = \frac{\partial y_1(\pi)}{\partial y_2(0)}; \quad \gamma = \frac{\partial y_1(\pi)}{\partial y_4(0)}; \quad \eta = \frac{\partial y_3(\pi)}{\partial y_2(0)}; \quad \xi = \frac{\partial y_3(\pi)}{\partial y_4(0)}.$$

Процесс уточнения производится до достижения условия:

$$\max \left| y_{j-1}^{(\alpha)(\pi)}(\pi) \right| \leq \varepsilon_1$$

При решении нелинейных задач методом В.З.Власова - В.В.Петрова на каждом этапе нагружения определяются приращения разрешающих функций с учетом изменения геометрии и внутренних сил от предыдущих этапов нагружения. Решение осуществляется на основе линейной системы уравнений. Вместо криволинейной зависимости, определяемой нелинейным решением, получается ломаная, которая по мере возрастания нагрузки будет расходиться с кривой. На это обратил внимание М.С.Корнишин (1964). В реферируемой работе используется приём уменьшения погрешности решения. Он состоит в следующем. Если к оболочке приложить нагрузку, равную части ξ_ℓ ($0 < \xi_\ell < 1$) нагрузки на этапе ℓ и изменившуюся геометрию принять за исходную, то последующее осуществление этапа ℓ произойдет при изменившейся податливости оболочки. Удачно подобранный коэффициент догрузки ξ_ℓ ($\ell = 1, 2, \dots, L$) позволяет существенно повысить точность построения характеристик сильфонов.

В третьей главе обосновывается возможность появления погрешностей монтажа сильфона в приборе силовой компенсации, что приводит к нарушению осевой симметрии сильфона и к неосевому приложению компенсирующего усилия. Вследствие этого вносится дополнительная погрешность в преобразование давления в силу.

Теоретически исследованы две общие схемы. В первой компенсирующая сила развивается упором; упор радиально смещен относительно центра дна, а дно радиально смещено относительно закрепления сильфона. Во второй дно сильфона жестко соединено с рычагом, смещено относительно закрепления сильфона радиально и повернуто в плоскости рычага. Исследование схем производится в

предположении, что перемещения и гибкость оси эквивалентного стержня малы. Получены зависимости для определения начального значения эффективной площади $F_{эф0}$, текущего её значения

$F_{эф}$ и погрешности η_f ,
где

$$\eta_f = \frac{F_{эф} - F_{эф0}}{F_{эф0}} \quad (6)$$

Для исследования влияния погрешностей сборки на эффективную площадь в силовой компенсации необходимо знать изгибную жесткость сильфона. Простейшее решение задачи об изгибе сильфона получено В.И.Королевым (1954) применительно к расчетной схеме в виде набора кольцевых пластин, скрепленных по краям. В реферируемой работе задача определения изгибной жесткости решена численно на основе системы дифференциальных уравнений для оболочки вращения с переменной толщиной стенки при симметричной изгибающей нагрузке типа Мейсснера, полученной В.С.Черниной (1959). В решении не делаются упрощающие допущения, касающиеся геометрии гофра.

В четвертой главе сообщаются результаты исследований и дается методика расчета сильфонов в силовой компенсации.

Экспериментальные исследования сильфонов показали, что при свободном ходе сильфона в пределах упругих деформаций взаимное перемещение экстремальных сечений полуволны гофра может на порядок и более превосходить наибольшую толщину стенки. При этом нелинейность характеристик достигает десятков процентов, а относительное изменение эффективной площади η_f - нескольких процентов. Экспериментально изучалось изменение эффективной площади в зависимости от погрешностей в осуществлении силовой компенсации.

Сопоставление теоретических результатов с экспериментальными показало, что в рамках принятой точности счета решения А и Б можно считать точными. Решение В приводит к завышенным перемещениям. Однако завышение имеет порядок расхождения между точным решением и экспериментом. Сопоставления нелинейных результатов с решением по линейной теории показывают, что перемещения могут отличаться более чем в два раза. Приводятся сопоставления теоретических и экспериментальных данных для изменения

эффективной площади сильфонов по давлению. Выполнен расчет начальной эффективной площади сильфонов, экспериментально исследованных А. Лаупа и Н. Вейл (1962), Мияири и др. (1963), *Pf. Exline* (1938), *S. Takeda* (1933).

Оценка точности метода В производилась в условиях проявления сильфоном наибольшей нелинейности. Указано на возможность применения приближенного метода в инженерных расчетах.

Теоретическое исследование начальной эффективной площади при осесимметричном нагружении сильфона производилось при различных значениях параметров гофра

$$\kappa = \frac{R_H}{R_B}; \quad m = \frac{z}{R_B} (z_H = z_B = z); \quad \delta_0 = \frac{h_0}{R_B},$$

где

z_H, z_B - радиусы наружного и внутреннего торцовых участков;
 h_0 - толщина стенки трубки-заготовки. Теоретические результаты исследования начальной эффективной площади сопоставляются с оценками (1) и (2).

В процессе нагружения сильфона давлением его эффективная площадь меняется. Построены графики зависимости эффективной площади $F_{эф}$ от давления и параметров гофрировки. При $m \approx 0,06$ увеличение положительного (изнутри) давления вызывает уменьшение функции $F_{эф}$, причем в начале нагружения (нагрузка любого знака) она меняется интенсивнее, чем при последующем росте давления. При отрицательном давлении функция $F_{эф}$ растет. Вне зависимости от знака давления большую склонность к изменению эффективной площади проявляют тонкостенные ($\delta_0 = 0,005 \div 0,010$) сильфоны. Отрицательному давлению всегда соответствует большее изменение функции $F_{эф}$, чем положительному. С уменьшением параметра m ($m \leq 0,02$) появляется тенденция к независимости функции $F_{эф}$ от знака давления. С ростом m изменение функции $F_{эф}$ по давлению увеличивается. Вышесказанное относится к сильфонам с параметром уплотнения гофра $\alpha_t = 0$, где

$$\alpha_t = \frac{t - t_0}{t_0},$$

t_0, t - соответственно величины шага неуплотненного и уплотненного гофра.

Если $t < t_0$, то по мере усиления этого неравенства прежняя (при $t = t_0$) закономерность изменения функции $F_{эф}$ по давлению

вначале ослабляется. При некотором значении уплотненного шага t^* изменение эффективной площади становится наименьшим. Дальнейшее уменьшение шага гофра меняет характер поведения функции $F_{\text{эфф}}$. Когда $t > t_0$, усиливаются те свойства функции, которые проявляются при $t = t_0$.

Если схема работы сильфона отличается от схемы силовой компенсации, характер изменения эффективной площади становится другим, а величина изменения большей. Так, при свободном ходе сильфона от давления эффективная площадь изменяется на порядок интенсивнее, чем в силовой компенсации.

В условиях силовой компенсации прямолинейная форма оси сильфона может оказаться неустойчивой, что приведет к увеличению погрешности прибора. Задачу об устойчивости сильфона по Эйлеру рассматривали А.С.Амвросиев (1935), Л.Е.Андреева (1932), Л.С.Вальшонок (1936), Г.Е.Зверьков и др. (1933), J.A. Haringx (1952), S. Tameda (1933). Обычно при вычислении критического давления значение эффективной площади принимается по эмпирической формуле (I), а изгибная жесткость эквивалентной стойки определяется из расчетной схемы сильфона в виде набора кольцевых пластин. В рассматриваемой работе при расчете сильфона на устойчивость эффективная площадь и изгибная жесткость определяются уточненно по графикам. Рассмотрены примеры определения критических давлений для сильфонов, экспериментально исследованных другими авторами.

Показано, что исследование влияния погрешностей сборки на величину эффективной площади сильфонов в силовой компенсации может производиться также при помощи соответствующих графиков. Приводятся примеры расчета погрешностей эффективной площади.

Исследование напряженного состояния сильфонов в нелинейной постановке производилось Н.М.Савкиным (1970) и M. Hamada (1938). Однако ими рассматривались сильфоны с малой нелинейностью. В реферируемой работе показано, что нелинейность напряжений у сильфонов, используемых в приборостроении, может достигать десятков процентов в условиях свободного хода и нескольких процентов в силовой компенсации. При этом нелинейный результат оказывается меньше, чем линейный и часто в условиях силовой компенсации линейный результат является достаточным. По приведенной номограмме определяются линейные значения максимальных эквивалентных напряжений и жесткости сильфона в зависимости от

его параметров. Построены графики для определения максимальных меридиональных изгибных напряжений при изгибе сильфона моментом.

Полученный графический материал позволяет по задаваемым геометрическим и физическим параметрам сильфона производить его инженерный расчет.

Выводы

1. Теоретически и экспериментально установлено, что сильфоны, используемые как чувствительные элементы приборов, являются геометрически нелинейными. Нелинейность характеристики по силе и давлению достигает десятков процентов, изменение эффективной площади — нескольких процентов.

2. Теоретическое исследование сильфонов выполнялось тремя численными методами, два из которых в рамках принятой точности счета можно считать точными. Приближенное решение задач на основе метода Власова — Петрова обеспечивает наименьшие затраты машинного времени.

3. Сопоставление результатов счета разными методами с экспериментом показало их хорошее соответствие, при определении эффективной площади и перемещений, на всем диапазоне давлений.

4. Начальная эффективная площадь сложно зависит от параметров гофра, особенно при большой относительной глубине гофрировки K . Однако вне связи с параметром K при малых относительных радиусах торцов ($m \leq 0,02$) начальная эффективная площадь практически не зависит от параметра толщины δ_0 . При возрастании параметра m связь начальной эффективной площади с δ_0 усиливается. Дана оценка погрешности эмпирических формул.

5. Установлена связь эффективной площади сильфонов с давлением при различных значениях параметров K, m, δ_0, α_t . В силовой компенсации у сильфонов с $m > 0,04 \pm 0,03$ ($K = 1,8$; $\alpha_t = 0$) при росте внутреннего давления эффективная площадь уменьшается, а при росте отрицательного — увеличивается. Увеличение протекает более интенсивно, чем уменьшение. В обоих слу-

чаях с ростом давления интенсивность изменения эффективной площади снижается. При малых радиусах торовых участков характер изменения эффективной площади практически не зависит от знака нагрузки. Если гофр уплотнен ($\kappa_c \neq 0$) или сильфон совершил ход, характер изменения эффективной площади меняется: при $\kappa_c > 0$ тенденция, свойственная сильфону с $\kappa_c = 0$, усиливается; при $\kappa_c < 0$ эта тенденция ослабляется и при некоторой величине уплотненного шага изменение эффективной площади по давлению становится наименьшим.

6. Эффективная площадь сильфонов в силовой компенсации сильно зависит от параметра δ_0 . Для тонких сильфонов эта зависимость наибольшая и она усиливается с ростом параметра m .

7. Получены графики относительного изменения эффективной площади в зависимости от параметров гофра и давления.

8. Установлено, что эффективная площадь сильфона при ходе изменяется на порядок интенсивнее, чем в силовой компенсации.

9. Исследование некоторых монтажных несовершенств позволяет оценить относительное изменение эффективной площади k_c по давлению при различных видах погрешностей сборки. Показано, что в основном функция k_c определяется погрешностью углового положения дна сильфона.

10. На основе уравнений типа Мейсснера получено решение для уточненного определения изгибной жесткости сильфона. Результаты приведены в виде графиков и позволяют производить уточненный расчет сильфона на устойчивость.

11. Исследовано напряженное состояние гофров сильфона в силовой компенсации и в условиях свободного хода. Разница между линейными и нелинейными результатами может достигать десятков процентов. Для оценки линейных напряжений и жесткости приведена номограмма. Построены графики для определения максимальных изгибающих меридиональных напряжений в сильфоне при изгибе его моментом в зависимости от параметров κ , m , δ_0 .

12. Полученный материал позволил построить инженерный метод расчета сильфонов в условиях силовой компенсации. Приведены примеры расчета.

Основные результаты работы опубликованы:

1. Андреева Л.Е., Петровский В.В., Теоретическое и экспериментальное исследование чувствительных элементов сильфонного типа. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции по автоматизации экспериментальных исследований. Куйбышев, июнь, 1971.
2. Андреева Л.Е., Горячева Л.Н., Петровский В.В., Исследование эффективной площади сильфонов, работающих в условиях силовой компенсации. Известия вузов. Машиностроение, № 3, 1972.
3. Способ изготовления сильфонов. Авторское свидетельство № 224459 от 22.XI.1968. Кл. 7в, 15/10.

