

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ

УДК 621.643.43

**В. К. ИТБАЕВ, А. М. БРЮХАНОВ, Р. Н. МИРСАЕВ, С. В. ПЕРЛОВ,
Р. Г. АХМАТВАЛИЕВ**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ГИБКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Предлагаются основные результаты работ, выполненных в УГАТУ в области исследования, проектирования и производства гибких металлических трубопроводов. Представлены основные положения метода оптимального проектирования гибких металлических рукавов, запатентованные способы и устройства для изготовления гибких металлических рукавов, сильфонных компенсаторов и их элементов. *Гибкий металлический трубопровод; напряженно-деформированное состояние; амплитудно-частотные характеристики; циклопрочность; оптимальное проектирование*

Под гибкими металлическими трубопроводами (ГМТ) подразумеваются гибкие металлические рукава (ГМР) и сильфонные компенсаторы (СК), которые широко применяются в авиакосмической технике, наземном и морском транспорте, на предприятиях нефтехимического производства, в металлургии и других отраслях [1]. Во многих случаях ГМТ является единственно возможным гибким соединением трубопроводных коммуникаций при следующих особенностях условий эксплуатации:

- работа в условиях агрессивных и особо-агрессивных рабочих окружающих сред;
- высокие и низкие температурные условия от -260 до $+740$ °С;
- работа и хранение в условиях высокого радиоактивного и солнечного облучения;
- сохраняемость эксплуатационных свойств в течение длительного срока хранения.

Указанными свойствами не обладают резиновые, полимерные шланги и трубы.

До недавнего времени единственными в России разработчиками и производителями ГМТ являлись ФГУП «Гидравлика» (Уфа) и ОА «Металлкомп» (С.-Петербург). В последние годы в России появился ряд предприятий, занимающихся изготовлением ГМТ, в частности, ЗАО «Сплав-Спецтехнология», ОАО «Компенз» (Великий Новгород), группа предприятий «Энергомаш» (Москва, Белгород) и др. Тем не менее основным изготовителем ГМТ для авиакосмической техники остается ФГУП «Гидравлика».

Отраслевая научно-исследовательская лаборатория (ОНИЛ) по гибким трубопроводным системам была создана в 1974 г. и была закреплена за ФГУП «Гидравлика» как за базовым предприятием.

Ниже излагаются основные достижения НИЛ по гибким трубопроводным системам в области оптимального проектирования и производства ГМТ за последние 3 года.

Метод оптимального проектирования сильфонных компенсаторов (СК) был разработан ранее проф. А. И. Крюковым, доц. С. В. Тарховым, ниже излагаются основные моменты по оптимальному проектированию гибких металлических рукавов (ГМР).

В качестве критериев оптимизации при проектировании ГМР целесообразно принять габаритные размеры и массу. Таковыми являются наружный диаметр D и длина L_0 .

Все параметры проектирования, входящие в математическую модель, представим в виде вектора

$$\bar{y} = (\bar{c}, \bar{x})^T,$$

где \bar{c} — вектор неуправляемых параметров оптимизации; \bar{x} — вектор управляемых параметров оптимизации.

Вектор неуправляемых параметров

$$\bar{c} = (c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_p)^T$$

включает величины, неизменяемые в процессе реализации поставленной задачи. К таким величинам относятся исходные данные, необходимые для проектирования ГМР:

- условный диаметр ГМР d_y (мм), определяемый проходным сечением трубопровода;

- характеристики материала ГРМ (оболочки и оплетки): модуль упругости E (МПа); коэффициент Пуассона μ , предел прочности σ_B (МПа); предел текучести $\sigma_{0,2}$ (МПа); плотность ρ (кг/м³);

- толщины материала листовой или трубной заготовок, из которых может быть изготовлена гофрированная оболочка проектируемого ГРМ;

- эксплуатационные нагрузки: внутреннее давление рабочей среды p (МПа), минимальный радиус изгиба ГРМ $R_{изг}$ (мм); минимальное δ_{min} (мм) и максимальное δ_{max} (мм) перемещения торцов ГРМ при циклическом нагружении; уровень воздействующих вибраций; расход рабочей среды;

- заданное число циклов наработки при воздействии повторно-статического нагружения $N_{экспл}$;

- весовые коэффициенты относительной значимости длины гибкой части ГРМ μ_1 и его массы μ_3 . Коэффициент относительной значимости наружного диаметра гофрированной оболочки μ_2 определяется из условия $\mu_2 = 1 - \mu_1 - \mu_3$.

Вектор управляемых параметров

$$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_M)^T$$

включает величины, изменение которых приводит к нахождению оптимального решения по критериям оптимизации. В качестве управляемых параметров ГРМ используются:

- радиус выступов гофров по наружной поверхности r_H ;

- радиус впадин гофров по наружной поверхности r_B ;

- высота гофра гофрированной оболочки h ;

- шаг гофрировки t ;

- толщина слоя гофрированной оболочки s ;

- число слоев гофрированной оболочки z ;

- число гофров ГРМ n ;

- диаметр проволоки оплетки $d_{опл}$;

- число слоев оплеток $z_{опл}$;

- число прядей в одном слое оплетки $n_{опл}$;

- число проволок в пряди $K_{пр}$;

- шаг оплетения T_h .

Размерность пространства проектирования определяется размерностью M вектора управляемых параметров \bar{x} (здесь равна 12).

Совокупность критериев оптимизации (длина L_0 , наружный диаметр D и масса M_0 ГРМ) образует вектор критериев оптимизации, представляющий собой векторную целе-

вую функцию:

$$F(\bar{x}) = (f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), f_3(\bar{x})),$$

где $f_1(\bar{x})$, $f_2(\bar{x})$ и $f_3(\bar{x})$ — критерии оптимизации соответственно по длине L_0 , наружному диаметру D и массе M_0 ГРМ.

Область допустимых проектных решений определяется исходя из ограничений, накладываемых условиями эксплуатации — заданной циклической прочностью $N_{экспл}$, p — внутренним давлением рабочей среды, $R_{изг}$ — минимально возможным радиусом изгиба ГРМ, с учетом коэффициентов запаса по давлению пластической деформации гофров n_d , по числу циклов наработки n_N и коэффициента s (для изделий авиакосмической техники $s_{min} = 10$) и будет выглядеть следующим образом:

$$D_{пр} = \{ \bar{x} : g_k(\bar{x}) \leq 0, k = \bar{1}, \bar{j} \},$$

где $j = 3$ — число ограничений по условиям эксплуатации; $g_k(\bar{x})$ — ограничения по условиям эксплуатации.

$$n_N N_{экспл} - N_{расч} \leq 0;$$

$$n_d p - p_{деф} \leq 0; \quad s d_y - R_{изг} \leq 0.$$

С учетом ограничений целевая функция оптимального проектирования ГРМ будет иметь следующий вид:

$$\bar{F}(\bar{x}) = \min(F(\bar{x})), \quad \bar{x} \in D_{пр},$$

где $D_{пр} = \{ \bar{x} : g_k(\bar{x}) \leq 0; \alpha_i \leq x_i \leq \beta_i, k = \bar{1}, \bar{3}, i = \bar{1}, \bar{12} \}$.

Созданная на основе этой целевой функции программа для ЭВМ позволяет сократить временные и финансовые затраты на проектирование ГРМ.

Выбор оптимальных параметров ГРМ исходя из технического задания (ТЗ) заказчика и вариантных расчетов согласно процесса проектирования ГРМ осуществляют в следующей последовательности:

- расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) гофрированной оболочки и определение предельного упругого перемещения полугофра;

- определение величины рабочего давления;

- расчет приведенного значения изгибной жесткости;

- расчет на прочность проволочной оплетки;

- расчет числа циклов изгибов до разрушения;
- расчеты на виброустойчивость и вибропрочность.

Математическая модель для расчета НДС тонкостенных оболочек вращения, разработанная в НИЛ по гибким трубопроводам с участием и под руководством научной школы А. П. Гусенкова (ИМАШ РАН) при высокочастотном, длительном упругопластическом нагружении и воздействии высокой температуры в конечном итоге представляет собой систему шести (а для оболочек с винтовой симметрией гофра — восьми) обыкновенных дифференциальных уравнений. Система получена на основе трех групп соотношений: уравнений равновесия; соотношений связи деформаций и перемещений; связи деформаций и нагружений.

Разрешающая система уравнений, разработанная в НИЛ по гибким трубопроводам с участием и под руководством научной школы А. П. Гусенкова (ИМАШ РАН), имеет вид

$$\frac{d\bar{Y}}{ds} = A \cdot \bar{Y} + \bar{F},$$

где s — длина дуги меридиана гофра в осевом сечении оболочки; $\bar{Y} = \{T_1, Q_1, M_1, u, w, \nu_1\}$ — вектор разрешающих функций; T_1, Q_1 — меридиональная и поперечная силы; u, w — меридиональная и нормальная компоненты перемещения; ν_1 — угол поворота нормали к срединной поверхности в меридиональном сечении; A — матрица жесткостно-геометрических коэффициентов размерности 6×6 (для оболочек с кольцевой симметрией гофров) и размерности 8×8 (для оболочек с винтовой симметрией гофров); \bar{F} — вектор свободных членов, состоящий из 6 или 8 элементов, включающих температурные составляющие и распределенные нагрузки.

В конечном итоге система уравнений позволяет получить: поля деформаций по сечениям полугофра и по толщине его стенки; величины продольной и изгибной жесткостей полугофра и всей гофрированной оболочки; величину давления начала пластической деформации гофра (местной потери устойчивости); число циклов до разрушения оболочки.

Расчет прочности силовых оплеток при действии внутреннего давления в ГМР сводится к определению прочности пряди

$$F_p = c \cdot n \cdot f,$$

где F_p — разрывное усилие пряди, n — количество проволок в пряди, f — разрывное

усилие проволоки, c — понижающий коэффициент, учитывающий конструкцию оплетки, неравномерность нагружения проволок оплетки и ряд других факторов.

На основе экспериментальных исследований установлено соотношение

$$C = \frac{1 + \bar{K}(n-1)}{n} = \frac{1 + 0,855(n-1)}{n},$$

где \bar{K} — коэффициент недогрузки проволок.

Для расчета виброустойчивости и вибропрочности ГМТ при кинематическом, инерционном и силовом возбуждении колебаний в НИЛ разработаны алгоритмы и пакеты прикладных программ, позволяющие построить амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), а затем, исходя из величин смещений в пределах полугофра, определить число циклов до разрушения. Учет рассеяния энергии при колебаниях ведется по методу Е. С. Сорокина. Значения декрементов колебаний необходимые для расчета АЧХ определяются с помощью аппроксимирующих зависимостей вида

$$\delta = \delta_0 + C_p \left(\frac{A}{A_0} \right)^{\alpha},$$

где δ_0, C_p — коэффициенты регрессии, полученные обработкой экспериментальных данных методом наименьших квадратов; A — амплитуда колебаний в пучности формы; $A_0 = 10$ мкм — минимальная амплитуда, имеющая смысл в технических расчетах.

Расчет АЧХ ведется методом последовательных приближений.

Для исследования вынужденных колебаний гибких металорукавов (ГМР) используется дифференциальное уравнение

$$(EI)_{пр} \frac{\partial^2 y}{\partial x^4} + m_p \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[\overline{E\Phi} \left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) \right] = \varepsilon q(x) \cos \omega t,$$

где выражение в квадратных скобках характеризует нелинейную упругость и механический гистерезис. Решение уравнения и построение АЧХ ведется по методу Г. С. Писаренко. При этом для построения «скелетной» кривой АЧХ используется нелинейная силовая характеристика ГМР, в виде

$$F = \frac{K}{l_{г.ч.}^3} (EI)_{пр} \times \left[y - 0,449 \left(\frac{y}{d_y} \right)^{-1,6} \left(\frac{d_y}{l_{г.ч.}} \right)^{-3} \right],$$

где y — прогиб при двустороннем закреплении ГМР; K — коэффициент, зависящий от условий закрепления концов ГМР; $l_{г.ч.}$ — длина гибкой части ГМР.

Вопросы производства ГМТ наиболее полно представлены в работе [1]. Ниже излагаются последние разработки в этой области, полученные непосредственно в НИЛ, гибкие трубопроводы за последние 2 года:

• Устройство для изготовления сильфонов (патент РФ на изобретение 2191651, авторы А. М. Брюханов, Г. И. Кашелевский, Р. Н. Мирсаев, С. В. Перлов и др.). Изобретение относится к устройствам для изготовления гофрированных оболочек (сильфонов) ГМТ методом гидроформования, отличающееся тем, что оно снабжено механизмом возврата в исходное положение, разъемными концевыми уплотняющими полуматрицами, что позволяет освободить рабочую зону для быстрого съема готового изделия и последующий возврат оснастки в исходное положение. В настоящее время завершается изготовление станка, в котором реализовано данное устройство. Основные технические параметры изготавливаемых гофрированных оболочек ГМТ:

Условный (внутренний) диаметр, мм	400
Длина трубной заготовки, мм	120–1300
Суммарная толщина стенок трубной заготовки, мм	2,8
Максимальное рабочее давление, МПа	12

• Стан для изготовления сварных прямошовных труб мерной длины (патент РФ на изобретение № 2185910, авторы А. М. Брюханов, Р. П. Мирсаев, Г. И. Кашелевский, С. В. Перлов и др.). использование изобретения относится к трубо-сварочному производству и может быть применено для изготовления труб методом аргонодуговой микроплазменной сварки. Задача изобретения — создание малогабаритного стана для изготовления тонкостенных мерных труб высокого качества.

• Гибкая труба (разработана, изготовлена и испытана, патент РФ на полезную модель № 37404, авторы Р. Г. Султанов, В. М. Горбаненко, В. К. Итбаев, Р. Н. Мирсаев и др.) для экстренного восстановления поврежденных газопроводов методом протягивания внутрь поврежденного участка и приварки по концам.

• Способ и устройство для протягивания гибкой трубы внутрь поврежденного участка трубопроводной коммуникации (патент РФ на изобретение № 228782, авторы А. М. Шаммазов, Р. Г. Султанов, В. К. Итбаев и др.).

• Конструкция компенсатора с усиленными демпфирующими характеристиками для системы выпуска отработанных газов евродвигателя «Патриот» (ОАО «УАЗ»).

Другие конструкции ГМР и СК разработанные в НИЛ ГТ опубликованы ранее [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусенков, А. П. Унифицированные гибкие элементы трубопроводов : справ. пособие / А. П. Гусенков, Б. Ю. Лукин, В. С. Шустов. М. : изд-во стандартов, 1988, 296 с.
2. Итбаев, В. К. Исследования и разработка перспективных конструкций гибких трубопроводов для авиакосмической техники / В. К. Итбаев, А. М. Брюханов // Общероссийский научно-технический журнал «Полюет». Изд-во «Машиностроение». М. : 2002, с. 81–82.

ОБ АВТОРАХ



Итбаев Валерий Каюмович, проф., зав. каф. основ конструир. механизмов и машин. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по авиац. двигателям (УГАТУ, 1996). Лауреат Прем. Правительства РФ. Заслуж. машиностроитель РБ. Иссл. в обл. динамики и прочн. авиац. двигателей.



Брюханов Анатолий Михайлович, ст. науч. сотр., зав. науч.-иссл. лаб. по гибким трубопроводам каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1967). Канд. техн. наук по технологии производства ЛА и двигателей (УАИ, 1981). Лаур. Премии Правит. РФ в обл. науки и техники (1997). Иссл. и разраб. в обл. технологии производства гибких трубопроводов.



Мирсаев Рафаиль Нуриевич, доц. БАГСУ. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УГАТУ, 1972). Канд. наук. Иссл. в обл. конструкций и технол. гибких метал. трубопроводов.



Ахматвалиев Рамис Габидуллаевич, ст. преп. каф. ОКМиМ УГАТУ. Дипл. инженер по техн. эксплуатации летат. аппаратов и двигателей. Иссл. в области проектир. и испытания гибких металлич. рукавов.



Перлов Станислав Валентинович, нач. отдела ПИО - 8440 ОАО НИИТ. Дипл. электромеханик (УАИ, 1975). Иссл. в обл. проектир. гибких трубопроводов, разработки оборудования для их производства и испытаний.