Таблица

Коэффициенты аппроксимации характеристики центробежного нагнетателя Н 235

Характеристики	Значения коэффициентов аппроксимации			
ε^2	a_0	a_1	a_2	a_3
	7,9625874E-01	10164044E-02	-2,2753497E-06	1,3403263E-08
$\eta_{пол}$	k_0	$к_1$	$к_2$	$к_3$
	2,7776621E-01	1,7920040E-03	1,0734749E-06	-4,8922907E-09
$[N_i / p_{вс}]_{пр}$	c_0	c_1	c_2	c_3
	-73,897992	2,3706396	-3,9635088E-03	2,4256791E-06

Степень сжатия для условий, отличных от номинальных будет определяться из соотношения, полученного с учетом уравнений (6)...(8)

$$\varepsilon = \left[1 + \left(\frac{n}{n_{н}}\right)^2 \cdot \frac{(ZRT)}{(ZRT)_{вс}}\left(\varepsilon_{н}^{\frac{m-1}{m}} - 1\right)\right]^{\frac{m-1}{m}} \quad (13)$$

Математическая модель ЦБН кроме соотношений, связывающих основные параметры, включает группу условий, отражающих технологические ограничения на работу оборудования. Это ограничения по частоте вращения снизу и сверху, приведенной объемной производительности (снизу по приближению к помпажной зоне и сверху из-за резкого падения политропического КПД), а также ограничение по мощности сверху, т.е

$$n_{min} \le n \le n_{max} \quad (14)$$

$$Q_{вс.пр\,min} \le Q_{вс.пр.} \le Q_{вс.пр\,max} \quad (15)$$

$$N_i \le N_{i\,max} \quad (16)$$

Кроме того, давление центробежного нагнетателя не должно превышать предельной величины, зависящей от технического состояния линейной части. Совокупность всех ограничений на технологические параметры описывает область допускаемых режимов (ОДР) [2].

В результате проведенной работы рассмотрено построение математической модели центробежного нагнетателя Н 235, описывающей режимы работы газоперекачивающего агрегата с газотурбинным приводом типа ГПА-16Р «Урал».

Полученная математическая модель может применяться для:

расчета режимов работы КС;

оптимизации режимов работы ГПА КС;

управления и контроля режимов работы ГПА;

параметрического контроля технологических параметров и технического состояния ГПА.

Разработанный подход к процессам эксплуатации газоперекачивающих агрегатов может применяться для остальных типов газотурбинных установок с учетом индивидуальных коэффициентов аппроксимации.

Литература

1. Альбом приведенных газодинамических характеристик и центробежных нагнетателей. Союзоргэнергогаз. ВНИИГАз, - М.,1985. – 87 с.
2. Синицын С.Н., Барцев И.В., Леонтьев Е.В. Влияние параметров природного газа на характеристики центробежных нагнетателей. М.: Недра, 1967, - В кн.: Транспорт и хранение газа (Труды ВНИИГАЗа, вып. 29/37).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ

Д.Л. Вахитов

Научный руководитель профессор С.Н. Харламов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г.Томск, Россия

При действии статической нагрузки задачи определения напряженно-деформированного состояния пространственных конструкций в общих постановках являются краевыми задачами механики деформированного твердого тела. Данные задачи, в предположении бесконечно малой деформации, сводятся к решениям при заданных граничных условиях систем, состоящих из геометрического соотношения (уравнения Коши, устанавливающего связи между перемещением и деформацией, и уравнение совместности деформации Сен-Венана), дифференциального уравнения равновесия (уравнений Навье), физического уравнения, определяющего связи между деформацией и напряжением. Не нарушая общности рассуждения, для упрощения выкладки, выбираем прямоугольные декартовые системы координат (x_1, x_2, x_3). В данных случаях рассматриваемые системы уравнений имеют следующий вид [4]:

– уравнение равновесия Навье

$$\psi = 1 - \frac{E_y}{E_x}\cdot\nu_{yz}^2 - \frac{E_z}{E_y}\cdot\nu_{yz}^2 - \frac{E_z}{E_x}\cdot\nu_{xz}^2 - 2\cdot\frac{E_z}{E_x}\cdot\nu_{xy}\cdot\nu_{yz}\cdot\nu_{xz}. \quad (1)$$

– уравнение Коши

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\cdot(u_{i,j} + u_{j,i}); \quad (2)$$

– уравнение совместной деформации Сен-Венана

$$\varepsilon_{ki,jl} + \varepsilon_{lj,ik} - \varepsilon_{li,jk} - \varepsilon_{kj,il} = 0, \quad (3)$$

где e_{ij} – компонент тензоров деформации; s_{ij} – компонент тензоров напряжения; F_i – компонент векторов объемных сил; u_i – компонент векторов перемещения; ,j – оператор дифференцирования = 1, 2, 3. В выражении (1) и далее суммирование проводится по повторяющемуся индексу.

Необходимо добавить физическое уравнение для замыкания систем (1 – 3), которое основываются на экспериментальном исследовании макроскопических физико-механических свойств материала. Напряжения и деформации в линейно-упругих моделях взаимно и однозначно линейно связаны друг с другом, а соответствующие выражения этой связи (называемый законом Гука) в общем виде записываются так:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl}\varepsilon_{kl}, \quad (4а)$$

где E_{ijkl} – тензор упругости [5].

Трубные стали, как показывают экспериментальные данные [1], при малых деформациях следуют закону Гука. Стандартные технические характеристики: коэффициент Пуассона n (либо модуль сдвига G); модуль Юнга E удобно использовать в качестве независимых параметров упругих свойств материала. Эти характеристики связаны между собой соотношением:

$$G = \frac{E}{2\cdot(1+\nu)}. \quad (5)$$

Вместо выражения (4а), для расчета тепловых деформаций, возникающих по причине изменения температуры стенок трубопровода в процессе эксплуатации, требуется использовать уравнение Дюамеля – Неймана, расчитанное из опытного факта аддитивности температурных и упругих деформаций:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl}(\varepsilon_{kl} - \alpha\cdot\Delta T), \quad (4б)$$

где ΔT – изменение температуры; α_{kj} – тензор коэффициентов температурного расширения.

Для изотропного материала тензор коэффициентов температурного расширения является шаровым, то есть $\alpha_{kl} \neq 0$, только при k = l, и $\alpha_{kk} = \alpha$. Если изменения температур стенки трубы не превышают 150˚С, то параметры α можно считать не зависящими от температур T коэффициентами линейных температурных расширений материалов.

Используя выбранный материальный параметр, соотношения (4б) для изотропных материалов можно записать в виде [3]:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu}\cdot\left[\varepsilon_{ij} + (\frac{3\cdot\nu}{1-2\cdot\nu} - \frac{1+\nu}{1-2\cdot\nu}\cdot\alpha\cdot\Delta T)\cdot\delta_{ij}\right],$$

где $\varepsilon_0 = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{33})/3$ – средние деформации (ε_0 – объемные деформации); δ_{ij} – символ Кронкера ($\delta_{ij} = 1$ при i = j; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$).

В общих случаях тензоры упругостей ортотропных материалов содержит 8 независимых компонент. Поэтому для записей явного вида выражений (4б) необходимо иметь 12 независимых материальных параметров. В качестве таких параметров наиболее удобно выбирать стандартные технические характеристики: E_x, E_y, E_z; $\nu_{xy,}$ $\nu_{yz,}$ ν_{xi}; G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}; α_x, α_y, α_z. В ортотропных материалах $\nu_{ij} \neq \nu_{ji}$ при $i \neq j$. Однако из условий симметричностей тензоров E_{ijkl} следует, что коэффициенты Пуассона $\nu_{xy,}$ $\nu_{yz,}$ ν_x не являются независимыми параметрами и связаны с другими характеристиками следующим образом:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y}; \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z}; \frac{\nu_{xz}}{E_x} = \frac{\nu_{zx}}{E_z}. \quad (6)$$

Выразив с учетом (6) компоненты тензора упругости E_{ijkl} в (4б) через указанные выше независимые характеристики и выписав компоненты тензора напряжений через компоненты тензора деформаций, для упругих ортотропных материалов при условии термо-механических нагружений получаем:

$$\overrightarrow{\sigma_x} = \frac{E_x}{\psi}\cdot(1 - \frac{E_z}{E_y}\cdot\nu_{yz}^2)\cdot(\varepsilon_x - \alpha_x * \Delta T) + \frac{E_y}{\psi}\cdot(\nu_{xy} + \frac{E_z}{E_y}\cdot\nu_{yz}\cdot\nu_{xz})\cdot(\varepsilon_y - \alpha_y\cdot\Delta T) +$$

$$+\frac{E_z}{\psi}\cdot(\nu_{xz} + \nu_{xy}\cdot\nu_{yz})\cdot(\varepsilon_z - \alpha_z\cdot\Delta T);$$

$$\overrightarrow{\sigma_y} = \frac{E_y}{\psi}\cdot(1 - \frac{E_z}{E_x}\cdot\nu_{xz}^2)\cdot(\varepsilon_y - \alpha_y * \Delta T) + \frac{E_y}{\psi}\cdot(\nu_{xz} + \frac{E_z}{E_y}\cdot\nu_{yz}\cdot\nu_{xz})\cdot(\varepsilon_x - \alpha_x\cdot\Delta T) +$$

$$+\frac{E_y}{\psi}\cdot(\nu_{yz} + \frac{E_y}{E_x}\cdot\nu_{xy}\cdot\nu_{xz})\cdot(\varepsilon_z - \alpha_z\cdot\Delta T);$$

$$\overrightarrow{\sigma_z} = \frac{E_z}{\psi} \cdot (1 - \frac{E_y}{E_x} \cdot \nu_{xy}^2) \cdot (\varepsilon_z - \alpha_z * \Delta T) + \frac{E_z}{\psi} \cdot (\nu_{yz} + \frac{E_y}{E_x} \cdot \nu_{xy} \cdot \nu_{xz}) \cdot (\varepsilon_y - \alpha_y \cdot \Delta T) +$$

$$+ \frac{E_z}{\psi} \cdot (\nu_{xz} + \nu_{xy} \cdot \nu_{yz}) \cdot (\varepsilon_x - \alpha_x \cdot \Delta T); \qquad (4в)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \cdot \varepsilon_{xy}; \sigma_{yz} = G_{yz} \cdot \varepsilon_{yz}; \sigma_{xz} = G_{xz} \cdot \varepsilon_{xz};$$

где $\psi = 1 - \frac{E_y}{E_x} \cdot \nu_{yz}^2 - \frac{E_z}{E_y} \cdot \nu_{yz}^2 - \frac{E_z}{E_x} \cdot \nu_{xz}^2 - 2 \cdot \frac{E_z}{E_x} \cdot \nu_{xy} \cdot \nu_{yz} \cdot \nu_{xz}.$

В общих случаях уравнения поверхностей нагружений для упруго-пластического материала имеет вид:

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{il}^p, T, \chi_i) = 0, \quad (4г)$$

где ε_{ij}^p – компонент тензоров пластической деформации; T – температуры; χ_i – параметр материалов, определяющий законы их упрочнений. Конкретная модель упруго-пластической среды, применяемое для анализов прочностей трубопровода, будет рассмотрено ниже.

Кроме физических нелинейностей свойства материала при анализах предельного состояния трубопровода необходимо также учитывать геометрические нелинейности конечной деформации. Для этого линейное соотношение Коши (2) заменяется нелинейным уравнением Грина:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \cdot (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j}).$$

Уравнения (1 – 4) составляют замкнутые системы, полностью определяющие статические напряженно-деформированные состояния трехмерных конструкций. Данные системы могут быть решены, если задано граничное условие на поверхностях:

$$u_i = u_j^*, \quad x \in S_1; \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} \cdot u_j = t_i, \quad x \in S_2, \quad (8)$$

где t_i – компонент векторов поверхностной силы; n_i – компонент векторов к нормалям к граничным поверхностям; $S_1 \cup S_2 = S$ – граничные поверхности; x – точки в трехмерных пространствах.

Результирующая система дифференциального уравнения в частной производной является системой эллиптических типов. Например, в случаях применений моделей линейно-упругих изотропных материалов и в предположениях бесконечной малости деформации, методы перемещения приводят к известному уравнению Ламе [2]:

$$3 \cdot (\mu + \lambda) \cdot \varepsilon_{0,i} + \mu \cdot \Delta u_i + F_i = 0 \quad i = \overline{1,3}, \quad (9)$$

где λ, μ – параметры Ламе, которые выражаются через техническую характеристику упругого свойства материалов ($\lambda = 2 \cdot \nu \cdot G/(1 - 2 \cdot \nu)$, $\mu = G$); Δ – операторы Лапласса. Соответственно, интегрирования систем (9) с учетом граничного условия (7) и (8) позволят определить все характеристики линейно-упругих напряженно-деформированных состояний трехмерных конструкций.

Литература

1. Касаткин Б.С., Мусияченко В.Ф. Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций. К.: Техніка, 1970. 188 с.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Пер. с англ. М.: Наука, 1984. 832 с.
3. Писаренко Г.С. Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. К.: Наукова Думка, 1976. 415 с.
4. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
5. Седов Л.И. Механика сплошной среды. В 2 т. 6-е изд., стер. СПб.: Издательство «Лань», 2004. 2 т.