

К СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА, ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ, УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКИ (УНТ)

© 2022г. Аким Гайфуллин Акимов

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, 450054 Уфа, пр-т Октября, 74
hakimov@anrb.ru

Актуальность работы заключается в том, что до сих пор не учитывается влияние среднего давления на устойчивость поперечного сечения трубопровода, цилиндрической оболочки, УНТ. Указанные элементы конструкций широко применяются в нефти - газо - продуктопроводах, в ракетных и авиационных двигателях, в воздушной и гидравлической системах самолетов и т.д. В гидроупругих системах одновременно происходит взаимодействие упругих и гидродинамических неустойчивостей.

В данной работе определяются критические давления внутри и вне трубопровода с учетом действия среднего избыточного давления на ее поверхности и кривизны поперечного сечения срединной поверхности.

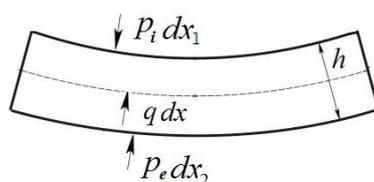


Рис. 1. Элемент dx поперечного сечения срединной поверхности трубопровода, цилиндрической оболочки, УНТ.

На внутреннюю и внешнюю поверхности конструкции действуют избыточные давления p_i и p_e жидкостей с плотностями ρ_i и ρ_e (рис. 1). Предполагается идеальность и несжимаемость жидкостей. Давления внутри и вне трубопровода p_i , p_e изменяются независимо друг от друга. Интенсивность их возрастания от нуля будем считать такой, чтобы инерционные силы в системе были малы. Уравнение радиальной статики тонкой цилиндрической оболочки, трубопровода относительно функций текущего и начального прогиба w и w_0 имеет вид [1] (положительное направление прогиба к центру)

$$\frac{\partial^6 w}{\partial \theta^6} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} + \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{TR^2}{D} \left(\frac{\partial^4 (w_0 + w)}{\partial \theta^4} + \frac{\partial^2 (w_0 + w)}{\partial \theta^2} \right) = \frac{R^4}{D} \frac{\partial^2 q}{\partial \theta^2}, \quad (1)$$

где q – внешнее давление, действующее на цилиндрическую оболочку, при определении которого исходим из предположения, что ρ_i , ρ_e и p_i , p_e остаются постоянными при изгибе трубопровода. θ – центральный угол, R – радиус срединной поверхности, D – цилиндрическая изгибная жесткость, T – кольцевое растягивающее усилие при $p_i > p_e$, которое находится по формуле

$$T = p_i \int_0^{\pi/2} \left(R - \frac{h}{2} \right) \cos \theta d\theta - p_e \int_0^{\pi/2} \left(R + \frac{h}{2} \right) \cos \theta d\theta = (p_i - p_e)R - (p_i + p_e) \frac{h}{2}, \quad (2)$$

где h – толщина. В предварительно деформированной конструкции остаточные напряжения отсутствуют, например, в результате отжига. При $p_i = 0$, $p_e = 0$ поперечное сечение срединной поверхности трубопровода имеет малое начальное w_0 и текущее w отклонения от оси x в виде

$$w_0 = W_{0n} \cos n\theta, \quad w = W_n \cos n\theta, \quad n = 2, 3, \dots \quad (3)$$

где W_{0n} , W_n – амплитуды малого начального и текущего отклонения. Подставляя (2), (3) в уравнение (1) и учитывая независимость нагрузки q от центрального угла θ , получаем отношение амплитуды текущего прогиба к амплитуде начального прогиба

$$\frac{W_n}{W_{0n}} = \frac{3(\alpha_1 - \alpha)}{n^2 - 1 - 3(\alpha_1 - \alpha)}, \quad \alpha = \frac{(p_i - p_e)R^3}{3D}, \quad \alpha_1 = \frac{(p_i + p_e)R^2 h}{2 \cdot 3D}. \quad (4)$$

Из (4) видно, при $\alpha_1 - \alpha = (n^2 - 1)/3$ прогиб в рассматриваемом линейном приближении растет неограниченно. Полученное условие устойчивости учитывает действие среднего давления α_1 . Здесь $\alpha_1 - \alpha$ представляет собой критическую комбинацию внешних воздействий p_i , p_e , для системы с заданными параметрами материалов и размерами E , h , R . С возрастанием внешних воздействий рост прогиба (4) происходит наиболее быстро при $n = 2$. Указанная критическая комбинация внешних воздействий по (4) является минимальной при $n = 2$. При $\alpha = 0$, $\alpha_1 = 1$ происходит потеря устойчивости круговой формы поперечного сечения трубопровода в виде эллипса ($n = 2$), причем, критическое давление потери устойчивости равно

$$p_{1cr} = \frac{3D}{R^2 h} = \frac{Eh^2}{4R^2(1 - \nu^2)}$$

откуда следует, что трубопровод может потерять устойчивость даже при нулевом перепаде давления вследствие действия среднего давления. Например, при $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0.3$, $R = 0.1$ м, $h = 0.002$ м и при нулевом перепаде давления критическое давление потери устойчивости p_{1cr} равно 21.9 МПа.

Трубопровод, оболочка, УНТ может потерять устойчивость даже при нулевом перепаде давления вследствие действия среднего давления.

Эти результаты могут быть использованы при моделировании деформирования трубопроводов, оболочек, УНТ, контактирующих с жидкостью и газом. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00578.

ЛИТЕРАТУРА

1. Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. Vibration Problems in Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1974.