

# Исследование пространственных собственных колебаний высотных труб с учетом вязкоупругих свойств материала

Талибжан Мамасолиевич Сабиржанов

talibjan1956@mail.ru

Ферганский политехнический институт

**Аннотация:** Приводится математическая модель, методика и алгоритм для оценки пространственных собственной колебаний осесимметричных сооружений с учетом переменности уклона и толщины конструкции в рамках вязкоупругой теории оболочки. Диссипативные свойства материала учитываются с использованием наследственной теории вязкоупругости Больцмана-Вольтера.

**Ключевые слова:** осесимметричные сооружения, высотные дымовые трубы, пространственные колебания, собственная частота, декремент колебаний, динамические характеристики, вязкоупругость, диссипативные свойства

## Investigation of spatial natural oscillations of high-rise pipes taking into account the viscoelastic properties of the material

Talibjon Mamasoliyevich Sabirjanov

talibjan1956@mail.ru

Fergana Polytechnic Institute

**Abstract:** A mathematical model, methodology and algorithm for estimating the spatial eigenvalues of axisymmetric structures, taking into account the variability of the slope and thickness of the structure in the framework of viscoelastic shell theory, is presented. Dissipative properties of the material are taken into account using the hereditary theory of Boltzmann-Voltaire viscoelasticity.

**Keywords:** axisymmetric structures, high-rise chimneys, spatial vibrations, natural frequency, vibration decrement, dynamic characteristics, viscoelasticity, dissipative properties

В данном разделе исследуются пространственные собственные колебания (частоты, формы и декременты колебаний) выше рассмотренных сооружений в вязкоупругих постановках (т.е. с учетом вязкоупругих свойств материала сооружений) с использованием разработанной методики и расчетных программ,

ориентированных на РС-IBM. При этом рассматриваемые сооружения моделируются вязкоупругой осесимметричной оболочкой с переменным уклоном и переменной толщиной, что позволяет учесть их реальную геометрию.

Для моделирования процесса деформирования сооружения (рис.1) при собственных колебаниях используется принцип возможных перемещений согласно которому сумма действующих на сооружение всех активных сил, включая силы инерции на возможных перемещениях равно нулю т.е.:

$$\begin{aligned}
 & - \int_F (\tilde{M}_s \delta\gamma_s + \tilde{M}_\theta \delta\gamma_\theta + \tilde{M}_{s\theta} \delta\gamma_{s\theta} + \tilde{N}_s \delta\varepsilon_s + \tilde{N}_\theta \delta\varepsilon_\theta + \tilde{N}_{s\theta} \delta\varepsilon_{s\theta}) dF - \\
 & - \int_F \rho (\ddot{u} \delta u + \ddot{v} \delta v + \ddot{w} \delta w) dF = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

При этом так же используются кинематические граничные условия

$$z = 0: \bar{U} = 0: \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

Здесь  $\bar{U}(\bar{x}, t) = \{u(\bar{x}, t), v(\bar{x}, t), w(\bar{x}, t)\}$ ;  $\bar{x} = \{z, \theta, r\}$  - координаты точки в цилиндрических координатах;  $u, v, w$  - перемещения соответственно по направлениям осей  $(z, \theta, r)$  цилиндрических координат;  $\tilde{M}_s, \tilde{M}_\theta, \tilde{M}_{s\theta}, \tilde{N}_s, \tilde{N}_\theta, \tilde{N}_{s\theta}$  - изгибающие, крутящие моменты и мембранные усилия;  $\delta\gamma_s, \delta\gamma_\theta, \delta\gamma_{s\theta}, \delta\varepsilon_s, \delta\varepsilon_\theta, \delta\varepsilon_{s\theta}$  - изохронные вариации кривизны и компонентов тензора деформации;  $\delta u, \delta v, \delta w$  - вариации перемещений в продольном, окружном и касательном направлениях;  $\rho$  - плотность материала оболочки.

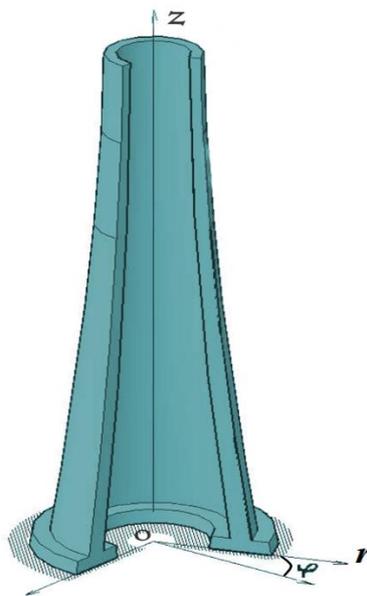


Рис.1. Модель осесимметричного сооружения

Для описания вязкоупругих свойств материала используется наследственная теория Больцмана-Вольтерра с ядром Ржаницына-Колтунова.

Для описания свойств материала сооружений (бетона) выбор вязкоупругих моделей объясняется близостью экспериментальных и теоретических результатов по напряженному состоянию бетона [3]. Значения параметров ядра релаксации находятся на основании методики, суть которой заключается в сопоставлении экспериментальной кривой ползучести с теоретической кривой. В указанной работе теоретические значения деформации для различных моментов времени детально протабулированы и построены кривые для достаточно широкого диапазона значений параметров ядра  $A, \beta, \alpha$ .

Для определения значений параметров ядра для бетона обработано несколько экспериментальных кривых ползучести бетона. Накладывая полученную экспериментальную кривую на семейство (пучок) теоретических и смещая ее по направлениям осей абсцисс и ординат, находим одну теоретическую кривую, совпадающую с экспериментальной. За искомые значения параметров ядра принимаем значения, соответствующие этой теоретической кривой.

В решаемой ниже задаче использованы параметры ядра релаксации для бетона, полученные с помощью изложенной выше методики из экспериментальных кривых ползучести, :

$$A=0,0194; \beta=0,00000014; \alpha=0,075.$$

Все геометрические размеры, рассмотренных выше сооружений взяты из проектных документаций. Некоторые размеры этих сооружений приведены в пункте 4 данной статьи.

В табл.1 приведены комплексные собственные частоты пространственных колебаний, полученные для выше перечисленных сооружений, с помощью разработанной методики и программы с использованием и учетом вязкоупругих свойств материала сооружений.

Таблица 1

Частота пространственных собственных колебаний (рад/сек) сооружений (высотных труб), полученных в вязкоупругой постановке

№ гармоник	Ново-Ангренская ТЭС			Экибастузская ТЭС			Сырдарьинская ТЭС		
	$\omega_1 = \omega_{1R}$ $i\omega_{1I}$	$\omega_2 = \omega_{2R}$ $i\omega_{2I}$	$\omega_3 = \omega_{3R}$ $i\omega_{3I}$	$\omega_1 = \omega_{1R}$ $i\omega_{1I}$	$\omega_2 = \omega_{2R}$ $i\omega_{2I}$	$\omega_3 = \omega_{3R}$ $i\omega_{3I}$	$\omega_1 = \omega_{1R}$ $i\omega_{1I}$	$\omega_2 = \omega_{2R}$ $i\omega_{2I}$	$\omega_3 = \omega_{3R}$ $i\omega_{3I}$
$n=0$ кр	22,14- -i0,32	44,46- -i0,60	74,22- -i0,95	18,38- -i0,27	36,09- -i0,49	59,27- -i0,77	24,64- -i0,35	48,40- -i0,64	79,09- -i1,01
$n=0$ ос	18,01- -i0,26	31,44- -i0,43	50,36- -i0,67	15,89- -i0,24	26,12- -i0,37	40,94- -i0,55	21,02- -i0,31	35,99- -i0,49	54,67- -i0,72
$n=1$	1,66- -i0,03	5,58- -i0,09	12,76- -i0,19	1,10- -i0,02	3,61- -i0,06	8,18- -i0,13	2,19- -i0,04	6,74- -i0,11	14,65- -i0,22
$n=2$	12,55- -i0,19	14,04- -i0,21	17,54- -i0,26	10,62- -i0,16	13,12- -i0,19	14,84- -i0,22	10,01- -i0,15	14,17- -i0,21	17,60- -i0,26

$n=3$	33,22- -i0,46	34,53- -i0,47	36,16- -i0,49	24,25- -i0,34	32,29- -i0,45	36,31- -i0,49	29,07- -i0,41	31,57- -i0,44	39,98- -i0,54
$n=4$	64,29- -i0,84	64,31- -i0,83	66,58- -i0,86	49,38- -i0,66	54,55- -i0,72	62,48- -i0,81	51,34- -i0,68	57,94- -i0,76	66,32- -i0,86
$n=5$	98,43- -i1,23	100,31- -i1,25	105,50- -i1,31	68,94- -i0,89	81,86- -i1,04	93,69- -i1,18	79,85- -i1,02	91,43- -i1,15	97,88- -i1,22

Действительные части ( $\omega_R$ ) собственных частот ( $\omega = \omega_R - i\omega_I$ ), приведенные в табл. 3, имеют смысл частот собственных колебаний сооружений, а мнимые части ( $\omega_I$ ) - несут информацию о коэффициентах демпфирования колебаний сооружений.

Сопоставление результатов, представленных в табл. 2 (упругая постановка) и табл. 3 (вязкоупругая постановка), показывает, что действительная часть комплексных частот несколько ниже, чем соответствующие значения собственных частот, найденные в упругой

$$\delta = -2\pi \frac{\omega_I}{\omega_R}$$

постановке, а логарифмический декремент  $\omega_R$  с ростом номера частот незначительно снижается. Это означает, что учет вязкоупругих свойств материала сооружений приводит к слабой зависимости логарифмического декремента колебаний от частоты.

В табл.2 приводится сравнение периодов изгибных колебаний, полученных как по одномерной теории (в упругой постановке) так и по теории оболочек (в упругой и вязкоупругой постановках) с результатами натуральных экспериментов [3].

Таблица 2

Периоды изгибных колебаний различных высотных дымовых труб

Высотные трубы	№ периода	Периоды колебаний (сек)				Натурный эксперимент
		Упругое решение		Вязкоупругое решение		
		одномерная теория	теория оболочки (при $n=1$ )	теория оболочки (при $n=1$ )		
Ново- Ангрен Ской ТЭС	T <sub>1</sub>	3,26	3,32	3,8	3,4	
	T <sub>2</sub>	0,91	0,99	1,12	1,0	
	T <sub>3</sub>	0,38	0,44	0,49	0,5	
	T <sub>4</sub>	0,21	0,25	0,28	0,3	
Сырдарьинской ТЭС	T <sub>1</sub>	2,5	2,12	2,88	2,8	
	T <sub>2</sub>	0,80	0,83	0,93	0,9	
	T <sub>3</sub>	0,33	0,38	0,42	0,4	
	T <sub>4</sub>	0,19	0,23	0,25	0,2	
Армянской АЭС	T <sub>1</sub>	1,56	1,42	2,03	1,6	
	T <sub>2</sub>	0,46	0,46	0,52	0,5	
	T <sub>3</sub>	0,21	0,22	0,24	0,2	
	T <sub>4</sub>	0,11	0,12	0,14	-	

Анализ приведенных результатов показывает, что значения периодов изгибных колебаний, полученные с помощью натурального эксперимента [4] и найденные теоретические по разработанной методике достаточно близки.

В табл.3 приведены значения логарифмического декремента колебаний высотной дымовой трубы Ново-Ангренской ГРЭС найденные натурным экспериментом [4] и теоретически для трех низших изгибных форм (при  $n=1$ ), с помощью разработанной методики и программы, учитывающих вязкоупругие свойства материала сооружения.

Таблица 3

Логарифмический декремент изгибных колебаний дымовой трубы Ново-Ангренской ТЭС

Метод определения декремента	Логарифмический декремент		
	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$
Экспериментальный	0,15	0,25	0,37
Теоретический	0,121	0,102	0,094

Значительные различия в значениях экспериментально и теоретически определенного логарифмического декремента (табл.3), в особенности, для второй и третьей формы, по-видимому, объясняется не учетом в рассмотренных моделях сухого трения и уноса энергии от сооружения в бесконечность.

### Использованная литература

1. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. М.: Высшая школа, 1976. 277 с.