УДК 621.1.86.1.001.24

**А.П.ГОСПОДАРИКОВ**, *д-р техн. наук, профессор, kafmat_@mail.ru*,
**Н.Л.ГОРОХОВ,** *аспирант, kafmat_@mail.ru*
*Санкт-Петербургский государственный горный университет*

**A.P.GOSPODARIKOV**, *Dr. in eng. sc., professor, kafmat_@mail.ru*,
**N.L.GOROKHOV,** *post-graduate student, kafmat_@mail.ru*
*Saint Petersburg State Mining University*

# ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Предложен численный алгоритм расчета сейсмостойкости трубопроводов при ведении взрывных работ скважинными зарядами или при воздействии природного землетрясения. В работе произведен учет независимости законов колебаний каждой из опор трубопровода.

***Ключевые слова***: трубопровод, сейсмические воздействия, численный алгоритм.

# DYNAMIC CALCULATION OF PIPELINES ON SEISMIC LOADS

The approach is considered according to seismic stability of pipelines at conducting explosive works borehole charges or at influence of natural earthquake. In this paper independence of fluctuations of support of the pipeline is considered also.

***Key words***: pipeline, seismic loads, numerical algorithm.

Прогноз напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопроводов при сейсмическом воздействии, например, в результате природного землетрясения или от бегущей сейсмической волны при взрыве мощных скважинных зарядов, на опорные конструкции (сотрясение опор) трубопроводов различного назначения (нефтяные, газовые), в том числе и трубопроводов атомных электрических станций (АЭС), является важной и актуальной задачей обеспечения сейсмостойкости оборудования не только в энергомашиностроении [2], но и для повышения сейсмической безопасности сооружений горных предприятий, ведущих взрывные работы.

Одним из эффективных подходов при динамическом расчете НДС трубопровода является представление последнего в виде стержневой системы с бесконечным числом степеней свободы. С учетом современного состояния вычислительной техники оправдано применение приема, позволяющего представить трубопровод как стержневую систему с конечным (достаточно обоснованным) числом степеней свободы. Несмотря на принятый приближенный подход [2] замены трубопровода (система взаимносоединенных цилиндрических оболочек) на систему стержней и сосредоточенных масс, вычислительные возможности ПК позволяют произвести дискретизацию трубопровода достаточным их числом, чтобы получить численные результаты, удовлетворяющие интересам инженерной практики. Такой подход к дискретизации объекта сплошной среды изложен в работе А.П.Филиппова [3] и в справочнике [1].

Итак, весь трубопровод разбивается узлами, в которых сосредоточены массы (полусумма масс, прилегающих к узлу участков), и на участки (часть трубопровода постоянной жесткости и кривизны). Каждая из таких масс перемещается только по одному фиксированному направлению; для массы,

имеющей более одной степени свободы, рассматривается столько независимых равных ей по величине масс, сколько степеней свободы имеет рассматриваемая масса [2].

Колебания такой механической системы описывается следующим матричным уравнением [3]:

$$\overline{Y} + AM\,\ddot{\overline{Y}} = \overline{e}(t), \qquad (1)$$

где $\overline{Y} = (y_i)_1^N$ и $\ddot{\overline{Y}} = (\ddot{y}_i)_1^N$ – векторы перемещений и ускорений масс соответственно; $A = (\delta_{ij})_1^N$ – квадратная матрица $N$-го порядка податливости (незащемленных узлов трубопровода); $M = (m_i)_1^N$ – диагональная матрица $N$-го порядка колеблющихся масс; $\overline{e}(t) = (e_i(t))_1^N$ – вектор внешнего воздействия; $N$ – число свободы рассматриваемой механической системы.

Алгоритм определения элементов $\delta_{ij}, i, j = \overline{1,N}$ матрицы податливости $A$: трубопровод рассчитывается на $N$ единичных нагружений, равных числу степеней свободы, по направлениям всех возможных перемещений точечных масс с последующим использованием вариационного принципа Кастильяно в матричной интерпретации [2, 3].

Отметим, что при отсутствии внешнего воздействия, т.е. $\overline{e}(t) = 0$, система неоднородных дифференциальных уравнений сводится к однородной, описывающей задачу о собственных колебаниях механической системы. Проблема собственных колебаний [1,3] сводится к нахождению собственных нескольких низших частот (основной тон и пять-шесть низших обертонов), что фактически в данном случае сводится к отысканию собственных чисел дифференциального оператора левой части матричного уравнения (1), что равносильно определению собственных чисел (используется метод Хаусхолдера [1]) матрицы $C = AM = (\delta_{ij} m_i)_1^N$ и собственных форм.

Внешнее воздействие (правая часть уравнений (1)) с учетом независимости колебаний опор трубопровода представляется в виде

$$\overline{e}(t) = \overline{e}_0(t) + \overline{e}_q(t), \qquad (2)$$

где $\overline{e}_0(t)$ – вектор равного сотрясения всех опор трубопровода (соответствует закону колебаний одной из опор, принимаемой в дальнейшем за нулевую опору); $q$ – число опор трубопровода без учета нулевой; $\overline{e}_q(t)$ – вектор колебаний рассматриваемой опоры из числа $q$.

Алгоритм формирования компонент вектора внешнего воздействия $\overline{e}(t)$ изложен в работе [3]:

$$\overline{e}_q(t) = L\overline{f}(t), \qquad (3)$$

где $\overline{f}(t) = (\overline{f}_m(t))_1^q$; $\overline{f}_m(t) = \Lambda_m(\overline{e}_q(t) - \overline{e}_0(t))$; $\Lambda_m$ – матрица направляющих косинусов собственных осей $m$-го участка трубопровода относительно начальных осей, привязанных к нулевой опоре; размерность вектора $\overline{f}(t)$, т.е. $\dim \overline{f}(t) = v$; $v = 0{,}5n/n$ ($n$ – степень статической неопределимости трубопровода как стержневой системы); матрица $L = (L_{ij})_{(N\times v)}$ – безразмерная, определяющая перемещения узлов трубопровода по всем возможным направлениям от единичных линейных перемещений закрепленных узлов (элементы матрицы $L$ определяются из решения трубопровода как стержневой системы, статически неопределимой $(n-1)$ раз [3]).

Таким образом, линейные перемещения закрепленных узлов и являются причиной возникновения вынужденных колебаний рассматриваемой механической системы, а зависимость (3) учитывает неодинаковые законы колебаний опор трубопровода.

Введя $Q = (Q_{ij})_{(N\times v)}$ – матрицу линейных перемещений всех узлов трубопровода по направлениям возможных перемещений от усилий, приложенных вдоль освобождаемых линейных ограничений, а также $\overline{l}(t) = (l_j(t))_1^v$ – вектор перемещений закрепленных узлов по направлению освобождаемых линейных ограничений, окончательно получим, что элементы матрицы $L$ определяются по формулам [3]:

$$L_{ij} = Q_{ij}/l_j;\ i = \overline{1,N},\ j = \overline{1,v}. \qquad (4)$$

После конкретизации матриц $A$, $M$ и вектора внешнего воздействия $\bar{e}(t)$ производится непосредственное численное интегрирование методом Рунге – Кутта системы дифференциальных уравнений (1), дополненной начальными условиями (перемещения и скорости узлов в начальный момент времени $t = 0$ равны нулю), а затем осуществляется динамический расчет трубопровода: определяются внутренние усилия и напряжения во всех узловых секциях трубопровода. Предварительно система уравнений (1) с помощью введения новых переменных и обозначений приводится к виду

$$\frac{d\bar{X}(t)}{dt} = H\bar{X}(t) + \bar{K}(t), \qquad (5)$$

где $\bar{X}(t) = (x_i(t))_1^{2\times N}$ – вектор неизвестных ($x_1 = \dot{y}_1$, $x_2 = \dot{y}_2, \ldots, x_N = \dot{y}_N$, $x_{N+1} = y_1, \ldots, x_{2\times N} = y_N$); матрица $H = (h_{ij})_1^{2N}$ и вектор $\bar{K}(t) = (k_j(t))_1^{2N}$ определяются по формулам работы [3].

В заключение отметим, что необходимые законы колебаний каждой из опор трубопровода ($\bar{e}_0(t), \bar{e}_q(t)$) необходимо задавать в виде зависимости перемещений во времени (сейсмограммы), а затем по изложенному алгоритму (формулы (3),(4)) находить вектор внешних воздействий на трубопровод (2).

## ЛИТЕРАТУРА


1. Вибрации в технике: Справочник: В 6 т. М.: Машиностроение. Т.1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В.Болотина, 1978. 352 с.

2. *Господариков А.П.* Расчет трубопроводов АЭС на сейсмостойкость / А.П.Господариков, Д.Н.Шульцев // Энергомашиностроение. 1978. № 12. С.23-24

3. *Филиппов А.П.* Колебания деформируемых систем. М.: Машиностроение, 1970. 736 с.


## REFERENCES


1. Vibrations in engineering: Quick reference: In 6 vol. Moscow: Machine industry. Vol.1. Fluctuations of linear systems / Under the editorship of V.V.Bolotin, 1978. 352 p.

2. *Gospodarikov A.P.*, *Schul'tsev D.N.* Calculation of pipelines of the atomic power station on seismic stability // Power-plant engineering. 1978. № 12. P.23-24.

3. *Filippov A.P.* Fluctuations of deformable systems. Moscow: Machine industry, 1970. 736 p.