ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИБРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ РАСЧЕТНО-ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДА С ДВУМЯ ОДНОСТОРОННИМИ СВЯЗЯМИ МЕТОДОМ ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА

А.Е. Павленко

При проектировании таких гибких сооружений, как надземные газопроводы, мостовые сооружения, башни, мачты сотовой связи и дымовые трубы перед проектировщиками встает трудоемкая задача, связанная с комплексным расчетом сооружений не только на статические, но и динамические нагрузки. Пренебрежение при расчетах вышеперечисленных сооружений динамическими нагрузками, их грубое упрощение или аппроксимация в некоторых случаях могут привести к существенному искажению уровня усилий, напряжений, перемещений и других характеристик напряженно-деформированного состояния конструкций (НДС).

Поэтому данная статья посвящена динамическому расчету надземных газопроводов (НГ), подверженных аэродинамическому воздействию. Расчет произведен методом временного анализа (МВА) [1]. Данный аналитический метод позволяет определять все характеристики НДС сооружения в любой момент времени при действии изменяющихся во времени нагрузок. В статье рассмотрен вопрос определения виброперемещений НГ, как одной из важнейших характеристик НДС конструкции.

Метод временного анализа основан на интегрировании неоднородного дифференциального уравнения:

$$M\ddot{Y}(t_i) + C(t_i)\dot{Y}(t_i) + K(t_i)Y(t_i) = P(t_i), \quad (1)$$

где $M, C(t_i), K(t_i) \in M_n(R) -$ положительно определенные и симметрические матрицы масс, демпфирования и жесткости соответственно; $Y(t_i)$, $P(t_i) -$ векторы искомых перемещений и заданных нагрузок.

Аэродинамическое воздействие (рис. 1, а) описывается периодической синусоидальной нагрузкой [2]:

$$P(t) = \frac{1}{2}\rho V^2 D\sin(\theta t), \quad (2)$$

где ρ – плотность воздуха; $V -$ скорость ветра, при которой частота срыва воздушных вихрей с боковой поверхности трубы соответствует частоте собственных колебаний; $D -$ наружный диаметр трубы газопровода; θ – частота вынужденных колебаний.

Учет внутреннего трения соответствует модели пропорционального демпфирования Рэлея (с целью сравнения результатов анализа с данными, полученными в пакете Ansys):

$$C = \alpha M + \beta K. \quad (3)$$

Алгоритм метода временного анализа был реализован в программном коде GPDYN, разработанном в математической среде Matlab.

В качестве объекта исследований принята 3-х пролетная дискретная расчетно-динамическая модель (рис. 1) надземного газопровода, представляющая из себя неразрезную балку с пятью сосредоточенными массами в пролете (15 степеней свободы). Поперечное сечение газопровода – труба ∅219×5 мм, длина пролета – 15 м. Временной анализ производен на 15-секундном интервале времени при условии возникновения резонанса: частота вынужденных колебаний равна частоте собственных колебаний по первому тону $\theta = \omega = 2{,}695$ Гц.

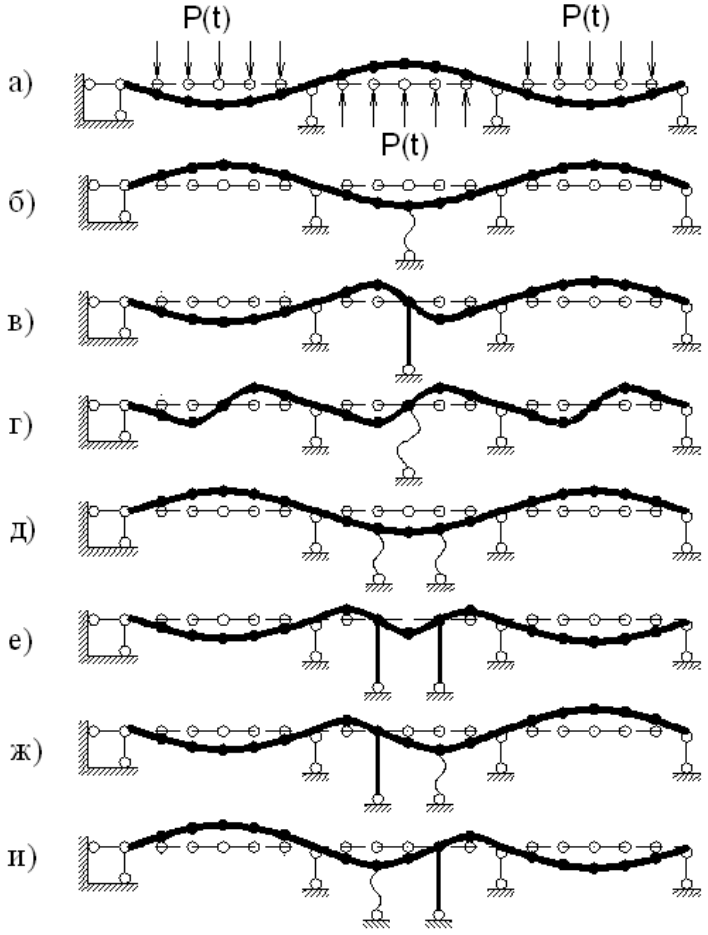
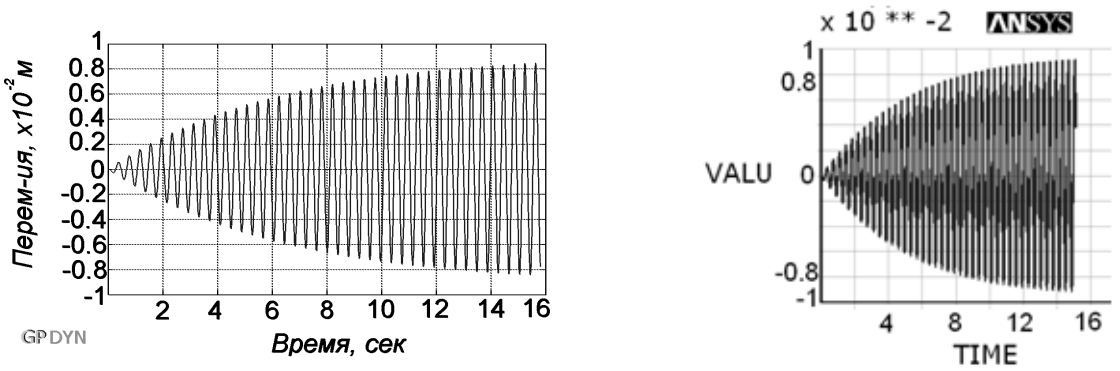


Рис. 1. Некоторые формы колебаний НГ: а – без ОС;
б, в, г – с одной ОС; д, е, ж, и – с двумя ОС в пролете

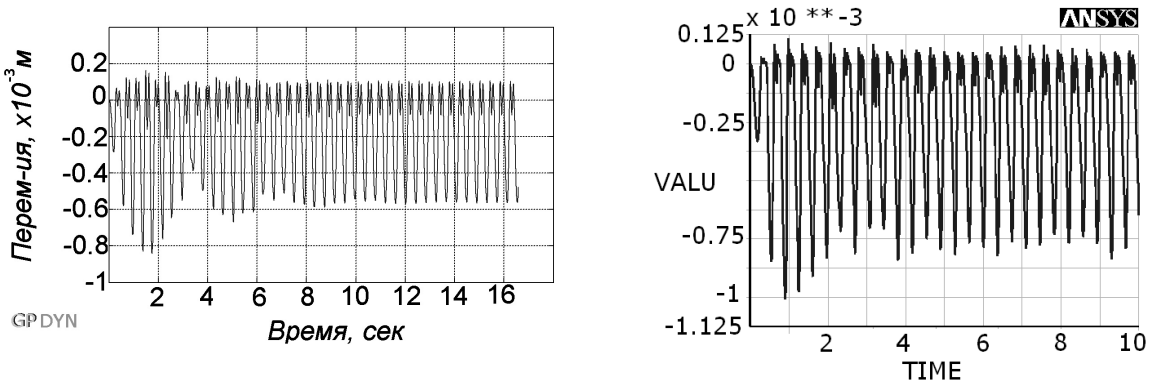
Осциллограммы виброперемещений центральной точки среднего пролета показаны на рис. 2, а, полученном МВА в Matlab. Для сравнения приведена осциллограмма виброперемещений центральной точки среднего пролета (рис. 2, б), полученная методом динамического анализа переходных процессов (transient analysis) в комплексе Ansys. К 15-й секунде величина виброперемещений достигает уровня 8,3 мм (рис. 2, а) по данным МВА и 9 мм по результатам анализа переходных процессов в пакете Ansys (рис. 2, б). В результате, расхождение значений составляет менее 9 %.



а) б)

Рис. 2. Виброперемещения центрального сечения среднего пролета при резонансных колебаниях надземного газопровода без ОС

Колебания в условиях резонанса с течением времени приводят к росту перемещений и усталостных напряжений в газопроводе. С целью обеспечения безаварийной эксплуатации НГ резонансные колебания необходимо ограничивать. Одним из наиболее эффективных и экономически выгодных методов является гашение колебаний с помощью односторонних связей (ОС). По данным осциллограмм, представленных на рис. 3, а и рис. 3, б, одна ОС, установленная в центральном сечении среднего пролета газопровода (рис. 1, в) оказывает существенное влияние на снижение уровня виброперемещений и способна уменьшить уровень колебаний почти на порядок: с 9 мм до 1 мм. Данные результаты расчета получены с учетом податливости троса, принятой $2{,}474 \cdot 10^{-4}$ м/кН.

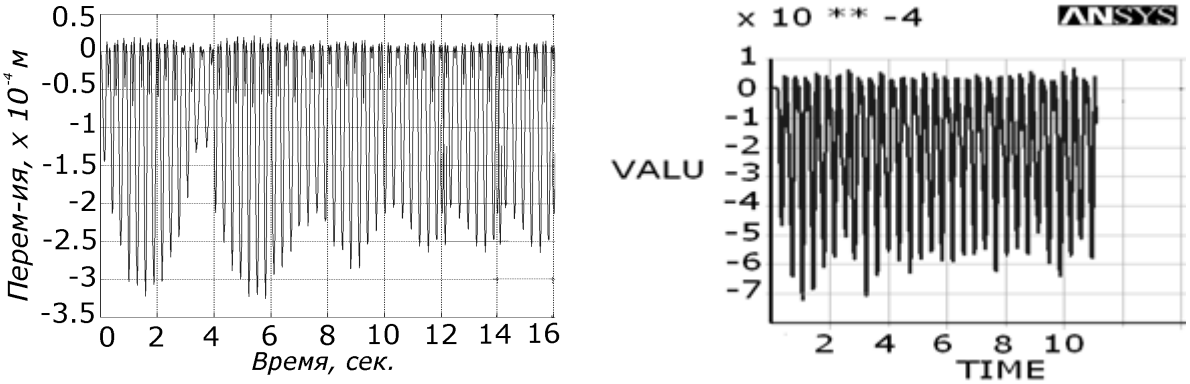


а) б)

Рис. 3. Виброперемещения центрального сечения среднего пролета при резонансных колебаниях надземного газопровода с одной ОС

Однако стоит отметить, что эффективность гашения в данном случае будет наблюдаться при колебаниях по первой форме (рис. 1, в), в то время, как в случае резонансных колебаний по второй форме [3], ОС будет выключена из расчетной схемы (рис. 1, г). Решением данной проблемы является установка второй ОС (рис. 1, д–и).

На рис. 4, а, и рис. 4, б показаны осциллограммы виброперемещений точек крепления ОС к трубе газопровода. По результатам расчетов уровень виброперемещений при совместной работе двух ОС в пролете не превышает 0,35 мм по данным МВА и 0,7 мм по результатам анализа переходных процессов в Ansys.



а) б)

Рис. 4. Виброперемещения точек крепления устройств гашения системы «газопровод + 2 ОС в пролете»

Таким образом, величина виброперемещений при работе системы с двумя ОС снижается по сравнению со значениями виброперемещений, присущих работе НГ без ОС, по данным МВА почти в 24 раза и в 12 раз по результатам расчета в Ansys. Данные показатели наглядно демонстрируют высокую эффективность использования двух ОС для снижения уровня виброперемещений надземного газопровода.

Библиографический список

1. Потапов, А.Н. Динамический анализ дискретных диссипативных систем при нестационарном воздействии: моногр. / А.Н. Потапов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 167 с.

2. Пановко, Я.Г. Устойчивость и колебания упругих сисем / Я.Г. Пановко. – 2-е изд., дополн. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1967. – 420 с.

3. Павленко, А.Е. Проблемы повышения аэродинамической устойчивости расчетно-динамической модели системы «газопровод–гаситель» / А.Е. Павленко // Научный поиск: материалы второй науч. конф. аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С. 124–128.