

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ НАДЗЕМНОГО ГАЗОПРОВОДА ПРИ ВЕТРОВОМ РЕЗОНАНСЕ

А.Н. Потапов, Н.Т. Тазеев, Р.Р. Амирова, О.Г. Орлова

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Рассмотрен активный способ гашения ветровых автоколебаний модели надземного газопровода, позволяющий отстраивать систему от резонансной частоты путем изменения ее расчетной схемы. Способ заключается в установке в одном из пролетов расчетной модели устройства гашения колебаний, работающего по принципу односторонней связи (ОС). Предложена новая математическая модель колебаний с симметричной формой деформирования оси надземного газопровода. Реализация нестационарного динамического процесса выполнена в рамках теории временного анализа. Интегрирование уравнения движения проведено в матричной форме для системы с конечным числом степеней свободы и учетом внутреннего трения. На численном примере дано сравнение расчетных моделей с симметричной и кососимметричной собственной формой колебания и показана эффективность предложенного подхода с симметричной формой.

Ключевые слова: надземный газопровод, автоколебания, устройство гашения колебаний, односторонняя связь, форма собственных колебаний, матрица жесткости, перемещение.

Введение

При колебаниях гибких сооружений типа надземных газопроводов часто происходят явления аэродинамической неустойчивости, обусловленные ветровым резонансом. Надземный газопровод совершает колебания в вертикальной плоскости, т. е. в направлении, перпендикулярном ветровому потоку. Само явление аэродинамической неустойчивости в гибких системах при обтекании цилиндрической поверхности ветровым потоком достаточно хорошо описано в классической литературе [1, 2].

Для решения практических вопросов гашения колебаний используются различные подходы, направленные либо на изменение характера обтекания сооружения или характера колебательного процесса [3–10] (активные способы гашения), либо на конструктивное ограничение уровня колебаний путем изменения частоты собственных колебаний [11–13] (пассивные способы). При этом большинство исследований ориентированы, главным образом, на численное моделирование аэродинамической задачи с применением упрощенных моделей демпфирования.

Отдельное место занимает аналитический метод решения задач аэродинамической неустойчивости надземных газопроводов, проводимый в рамках теории временного анализа [14]. В работах [15, 16] для гашения колебаний газопровода используется устройство, выполненное в виде односторонней связи, в результате чего аэродинамическая задача становится конструктивно нелинейной, так как в процессе колебаний расчетной модели газопровода происходит изменение ее расчетной схемы (рис. 1).

При нестационарном циклическом процессе колебаний происходит поочередный переход от базовой модели (БМ), когда ОС выключена из работы (рис. 1а), к модели с дополнительной связью (МДС), когда ОС включена в работу (рис. 1б). Включение ОС (троса) в работу эквивалентно появлению дополнительной связи в виде опорного стержня. При этом следует отметить, что в состояниях БМ и МДС расчетная модель будет иметь различные матрицы жесткости, так как это обусловлено различием расчетных схем.

В настоящей статье дается критический анализ математической модели газопровода с кососимметричной формой колебаний (рис. 1б), возникающей в новом состоянии расчетной модели при ее переходе от БМ к МДС [15, 16]. Эта форма собственных колебаний соответствует основному тону модели в состоянии МДС. Также рассматривается более совершенная математическая модель колебаний, основу которой составляет симметричная форма колебаний оси газопровода, представляющая форму собственных колебаний для первого обертона модели в состоянии МДС (рис. 1в).

1. Экспериментальные исследования модели «балка – трос»

Одним из соавторов статьи (Н.Т. Тазеевым) был проведен эксперимент, в котором гибкая балка подвергалась вибрационной нагрузке от легкого электродвигателя, с помощью которого моделировалось аэродинамическое воздействие. Параметры расчетной динамической модели: сечение – 50×4 мм, длина 2 м, односторонняя связь в виде троса, в рамках

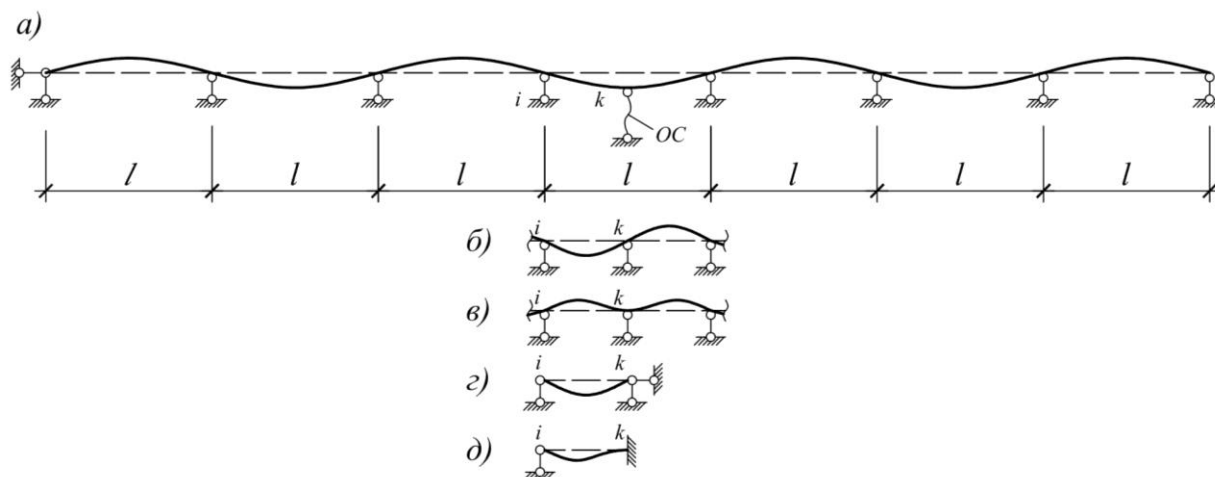


Рис. 1. Расчетная модель надземного газопровода: а – модель с устройством гашения колебаний в центральном пролете; б, в – кососимметричная (б) и симметричная (в) формы колебаний при натяжении троса; г, д – расчетные схемы балок на участке $i-k$ соответственно при кососимметричной и симметричной формах колебаний

эксперимента принимаемого нерастяжимым. Масса двигателя – 0,36 кг, угловая частота двигателя, вызывающая резонанс $\theta = 9$ рад/с, амплитуда активной составляющей вертикальной центробежной силы $P_0 = 5,3$ кг. Цель эксперимента: определить форму колебания деформированной оси балки в момент включения в работу ОС (троса); показать, что форма собственных колебаний модели в состоянии МДС является симметричной вследствие отсутствия поворотов центрального сечения в точке крепления ОС к балке.

Основная предпосылка заключалась в том, что переходной режим балки при включении ОС в работу (трос находится в натянутом состоянии) длится очень короткий промежуток времени (сотые или тысячные доли секунды), что во много раз меньше, чем пребывание расчетной модели в состоянии БМ, когда ОС отключена. Поскольку в состоянии БМ собственная форма колебаний оси балки является симметричной, то при переходе в состояние МДС собственная форма колебаний из-за кратковременности пребывания модели также останется симметричной. Иначе говоря, вследствие инерции движения балки в новом состоянии система не успевает сменить тип симметрии формы колебаний.

Для того чтобы такой переход от симметричной к кососимметричной форме состоялся, необходимо длительное пребывание балки в состоянии МДС, которое по времени может соответствовать нескольким периодам (или даже десяткам периодов) собственных колебаний системы. Только в этом случае, когда система из переходного режима перейдет в установившийся режим, станет возможным переход к кососимметричной форме колебаний, которая в энергетическом плане является более оптимальной, так как соответствует основному тону колебаний расчетной модели балки в состоянии МДС.

На рис. 2 дано фото экспериментальной установки в момент натяжения ОС (а) и выключения из работы (б). На обоих рисунках видно, что упругая линия балки в точке крепления троса сохраняет свою симметрию относительно вертикальной оси, а центральное сечение балки не поворачивается относительно горизонтали. На рис. 3 представлены частотные характеристики колебаний БМ (рис. 3а) и модели с тросом (рис. 3б), фиксируемые при помощи специального приложения Vibration analysis. Частота колебаний БМ составляет 1,62 Гц, максимальное значение амплитуды виброперемещений – 62,94 мм, ускорений – 6,06 мм/с². Частота колебаний модели с тросом – 4,94 Гц. Амплитуда виброперемещений – 2,27 мм, ускорений – 23,59 мм/с².

Данные эксперимента подтверждают сделанные выше рассуждения о том, что центральная часть пролета расчетной модели балки (см. рис. 1) в момент натяжения троса имеет конфигурацию, изображенную на рис. 1в. Это означает, что центральное сечение k в процессе колебаний перемещается поступательно без поворота. При этом участок $i-k$ на расчетной схеме имеет вид балки с опорным закреплением по схеме «шарнир – заделка» (рис. 1д). Если учитывать податливость троса, то сечение k будет превышать уровень горизонтального пунктира, и тогда заделка на данном участке становится скользящей в вертикальном направлении.

Так как жесткость балки на рис. 1д при симметричной форме колебаний выше жесткости шарнирной балки (рис. 1г) при кососимметричной форме колебаний, то перемещения в первой балке будут ниже, чем в шарнирной балке.

Поэтому устройство гашения колебаний при ветровом резонансе по симметричной форме колебаний в состоянии МДС будет более эффективным: уменьшатся прогибы не только в централь-

ном пролете, где установлена ОС, но и в соседних пролетах расчетной модели газопровода. Это, в свою очередь, позволит увеличить (оптимизировать) шаг расстановки устройств гашения колебаний по сравнению с вариантом расчета при кососимметричной форме колебаний.

2. Расчетный алгоритм

Математическое моделирование процесса вынужденных колебаний расчетной динамической модели надземного газопровода выполнялось методом временного анализа, разработанного для конечномерной системы с учетом внутреннего тре-

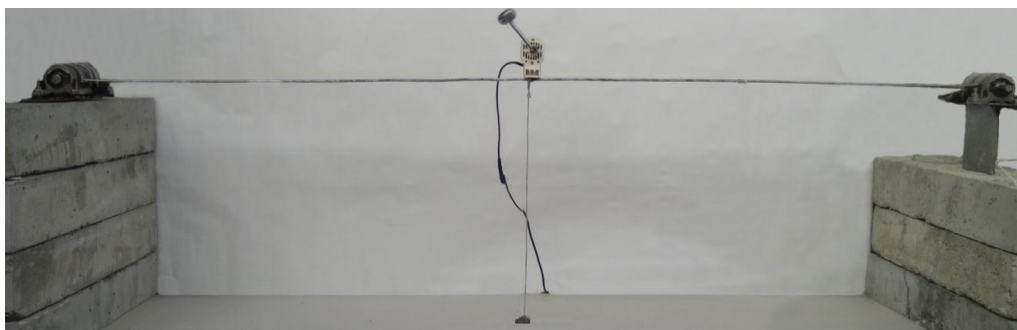
ния, называемой далее дискретной диссипативной системой (ДДС) [14]. Уравнение движения упругой ДДС в рамках линейной модели вязкого сопротивления (1) и начальные условия (2) имеют вид:

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

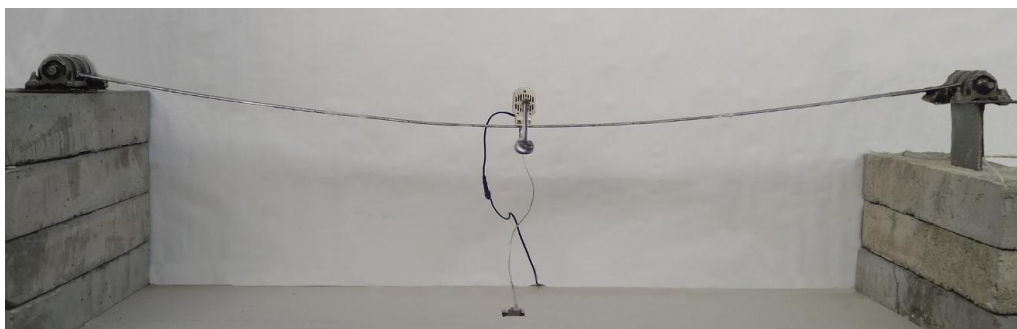
$$Y_0 = Y(t_i), \dot{Y}_0 = \dot{Y}(t_i) (i = 0, 1, 2, \dots), \quad (2)$$

где $M = \text{diag}(m_1, \dots, m_n)$, $C = C^T$, $K = K^T$ – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости; $Y(t)$, $P(t)$ – векторы перемещений и внешней нагрузки; индекс n означает число степеней свободы расчетной модели.

Аэродинамическое действие ветровой нагрузки принято по закону синуса:

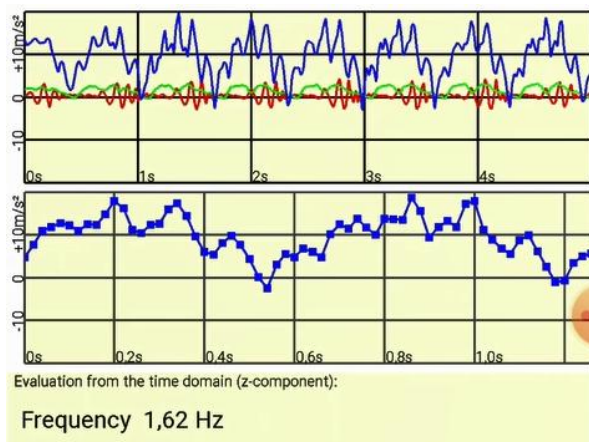


а)

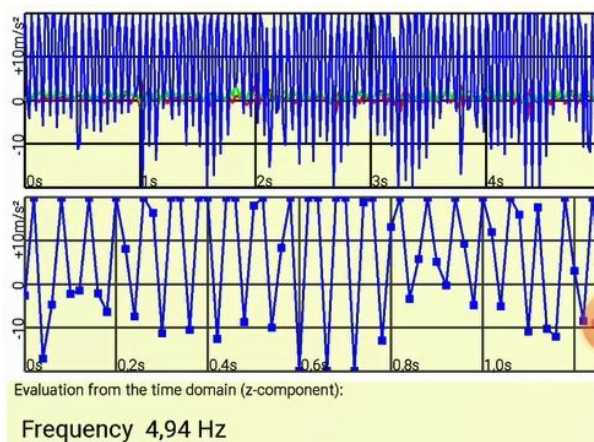


б)

Рис. 2. Расчетная модель балки: а – в состоянии натяжения троса; б – в состоянии выключенного троса



а)



б)

Рис. 3. Характеристики колебаний установки: а – БМ; б – модель с тросом

$$P(t) = P_0 \cdot \sin(\theta t), \quad (3)$$

где P_0 – вектор амплитуд периодической нагрузки; θ – число вихрей, сбегаящих с цилиндрической поверхности трубы за 2π секунд (круговая частота возмущающей нагрузки).

Характеристическое уравнение, соответствующее однородному дифференциальному уравнению (1), представляет собой по физическому смыслу уравнение движения собственных форм колебаний и имеет вид матричного квадратного уравнения (МКУ):

$$MS^2 + CS + K = 0. \quad (4)$$

В уравнении (4) искомая матрица S является матрицей внутренних (спектральных) динамических характеристик ДДС. Переход от однородного уравнения, соответствующего (1), к характеристическому МКУ (4) выполняется с помощью матричной экспоненциальной функции $\Phi(t) = e^{St}$. Матрица $\Phi(t)$ является фундаментальной, если S удовлетворяет МКУ (4).

Решение МКУ в аналитической форме записи представляется в виде корневой пары:

$$S_{1,2} = M^{-1}(-C + V \pm U)/2, \quad (5)$$

где $V = -V^T$, $U = U^T$ – кососимметрическая и симметрическая матрицы, связанные между собой системой матричных соотношений. Эти соотношения реализованы в программе по решению уравнения (4) (в системе MATLAB). Поскольку колебания конструктивно нелинейной ДДС с учетом работы ОС представляют упругий процесс, то элементы матрицы V всегда вещественные, а элементы U – мнимые. По этой причине матричные корни в (5) являются комплексно-сопряженными [14]: $S_1 = S$, $S_2 = \bar{S}$.

Уравнение реакции расчетной модели записывается в виде интеграла Дюамеля ($t \geq t_i$) [8]:

$$Y(t) = 2Re\{\Phi(t - t_i)U^{-1}M[-\bar{S}Y_0 + \dot{Y}_0] + U^{-1}tP_0\}, \quad (6)$$

где

$$I(t) = \int_{t_i}^t \Phi(t - \tau)^T \sin(\theta\tau) d\tau \quad (7)$$

– интеграл с переменным верхним пределом; нижний предел интегрирования t_i соответствует времени включения/выключения ОС.

Первое слагаемое в уравнении реакции (6) содержит реакцию при свободных колебаниях, вызываемую векторами начальных условий (2), второе – реакцию при вынужденных колебаниях от внешнего воздействия (3).

При постоянном скоростном напоре, когда частота срывов θ одинакова для всех участков расчетной модели, выражение (7) преобразуется к виду:

$$I(t) = [(S^T)^2 + \theta^2]^{-1}F(t), \quad (8)$$

где матричная функция $F(t)$ записывается так (E – единичная матрица):

$$F(t) = S^t[\Phi(t - t_i)^T \sin(\theta t_i) - E \cdot \sin(\theta t_i)] + [\Phi(t - t_i)^T \cos(\theta t_i) - E \cdot \cos(\theta t_i)]\theta. \quad (9)$$

Как уже отмечено выше, в переходных состояниях расчетной модели (БМ / МДС), соответствующих критическим временным точкам t_i ($i = 0, 1, \dots$), происходят изменения элементов матрицы жест-

кости K . Одновременно с изменением элементов матрицы K происходит изменение элементов матрицы демпфирования C , так как построение модели демпфирования, как правило, зависит от характеристик жесткости системы. Так как весь процесс колебаний состоит из переходов расчетной модели из одного состояния в другое (включение / выключение ОС), то реакция конструктивно нелинейной системы во времени разбивается на последовательные интервалы: $t \in [t_i, t_{i+1}]$ ($i = 0, 1, \dots$), внутри которых параметры расчетной модели (элементы матриц жесткости и демпфирования) постоянны.

Таким образом, при вычислении реакции системы в момент перехода через критическую временную точку t_i в уравнениях (4), (6), (8), (9) происходят следующие изменения и корректировки. Первое: осуществляется смена внешних динамических параметров расчетной модели (матрицы C и K в предыдущем состоянии модели заменяются аналогичными матрицами в новом состоянии). Второе: осуществляется изменение (смена) внутренних динамических параметров модели, а именно, из решения МКУ (4) отыскиваются новые значения матричных корней: S, \bar{S} с соответствующим значением матрицы U в (5). Параллельно с этим корректируется фундаментальная матрица $\Phi(t-t_i) = e^{S(t-t_i)}$. Третье: в уравнениях (6) и (9) проводится замена индексов ($i-1$) на i , что соответствует колебаниям модели на интервале $t \in [t_i, t_{i+1}]$. И, наконец, четвертое: проводится смена начальных условий в уравнении реакции при свободных колебаниях (6), т. е. в качестве векторов начальных условий (2) принимаются векторы перемещений и скоростей, значения которых вычисляются по реакции системы в конце предыдущего интервала времени $t \in [t_{i-1}, t_i]$. В целом реакция конструктивно нелинейной модели имеет квазипериодический характер и сопровождается включением/выключением ОС при соответствующих критических временных точках t_i ($i = 0, 1, \dots$).

3. Численная реализация задачи.

Анализ результатов

Расчетная схема (см. рис. 1) газопровода имеет вид многопролетной неразрезной балки с равными длинами пролетов $l = 15$ м и числом пролетов 11. При построении РДМ каждый пролет разбивался на 4 элементарных участка длиной $a = l / 4$ с расположением точечных масс в узловых сечениях (рис. 4), число степеней свободы системы $n = 33$.

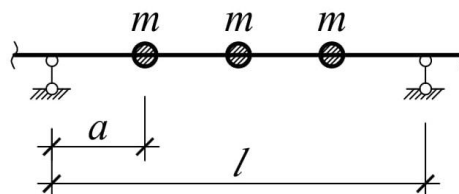


Рис. 4. Пролет расчетной модели с тремя точечными массами

Исходные данные для расчета: внешний и внутренний диаметры сечения трубы соответственно $D = 219$ мм, $d = 209$ мм, модуль упругости $E = 2,1 \times 10^8$ кН/м², логарифмический декремент колебаний стальной трубы $\delta = 0,07$. Податливость троса на растяжение принимает значения в диапазоне от 0,001 до 0,1 м/кН.

Погонная масса трубопровода с газом $m_{\text{пог}} = 0,027$ кН·с²/м², точечная масса i -м узле составляет: $m_i = m_{\text{пог}} \cdot a = 0,1017$ кН·с²/м. Скорость ветра, вызывающая резонанс данной модели, составляет $v = 2,951$ м/с. Амплитудное значение узловой возмущающей нагрузки $p_{0i} = 0,0043$ кН.

Матрица демпфирования C принималась в соответствии с моделью непропорционального демпфирования по формуле [14]:

$$C = (KT + TK)/2, \quad (10)$$

где $T = \text{diag}(t_1, \dots, t_n)$, $t_i = \delta/\pi \cdot \sqrt{\frac{m_i}{r_{ii}}}$, r_{ii} – диагональный элемент матрицы жесткости K .

Анализ колебаний расчетной модели проводился для варианта деформирования оси многопролетной балки по кососимметричной (рис. 1б) и симметричной (см. рис. 1в) формам.

На рис. 5 показана осциллограмма перемещений среднего сечения центрального пролета расчетной модели газопровода в точке крепления троса к трубе (точка k , рис. 1). Осциллограмма перемещений точки k при симметричной форме деформирования оси балки приведена на фрагменте (рис. 5б, красная кривая). Видно, что вариант с кососимметричной формой деформирования оси

(рис. 5б, черная кривая) приводит к большим перемещениям по сравнению с перемещениями сечения при симметричной форме. Для сравнения пунктирной линией приведена осциллограмма перемещений сечения k БМ (без учета устройства гашения колебаний).

На рис. 6 даны осциллограммы перемещений средних сечений в первом и последнем (11-м) пролетах расчетной модели. Особенностью этих осциллограмм является то, что для варианта с кососимметричной формой деформирования перемещения средних сечений в крайних пролетах (цифры пунктирных кривых – номера пролетов, рис. 6б) значительно отличаются между собой, в то время как для симметричной формы деформирования перемещения средних сечений совпадают.

Следует также отметить, что амплитуды перемещений, полученные по симметричной форме деформирования оси балки (красная кривая), меньше соответствующих амплитуд по кососимметричной форме деформирования. Это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что взятая за основу расчета симметричная форма собственных колебаний является наиболее эффективной при построении динамической реакции конструктивно нелинейной системы.

Результаты, представленные на рис. 7 для центрального сечения k в точке крепления трубы и троса, в целом повторяют выводы, сделанные по рис. 6. Для отдельных участков осциллограммы (фрагмент 2, рис. 7в) амплитуды перемещений красной кривой в 2 с небольшим раза

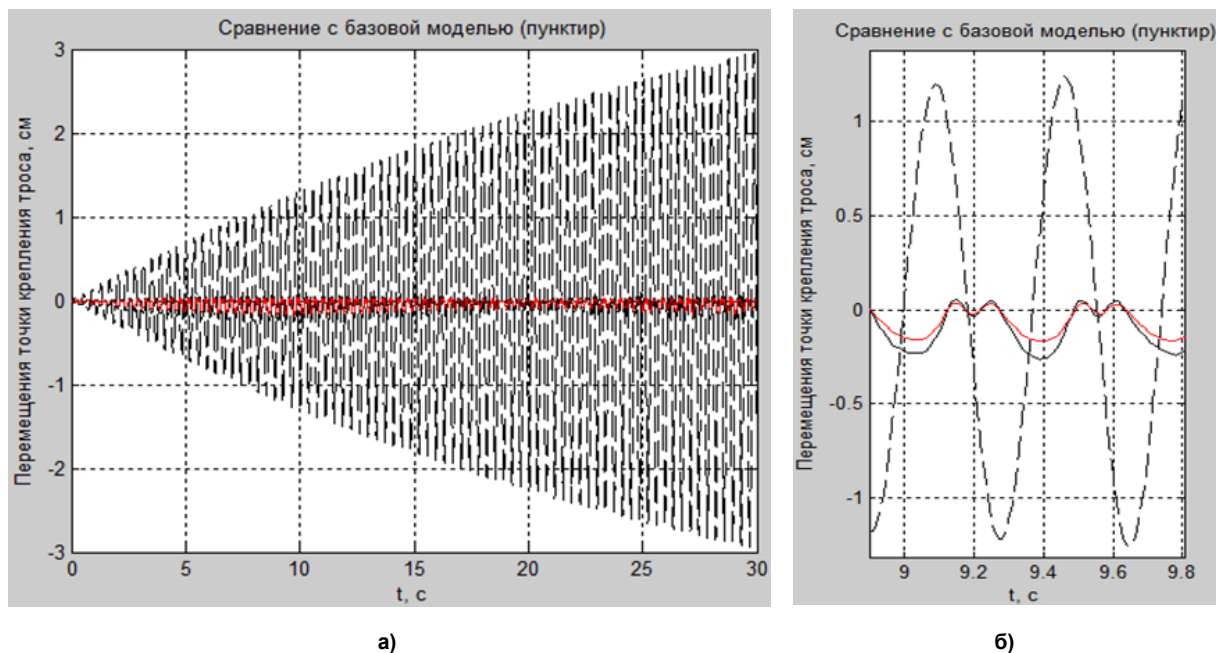


Рис. 5. Осциллограмма перемещений точки крепления троса в середине центрального пролета: а – перемещения точки крепления троса на интервале 30 с; б – фрагмент осциллограммы перемещений (пунктир – БМ; красная кривая – по симметричной форме; сплошная черная кривая – по кососимметричной)

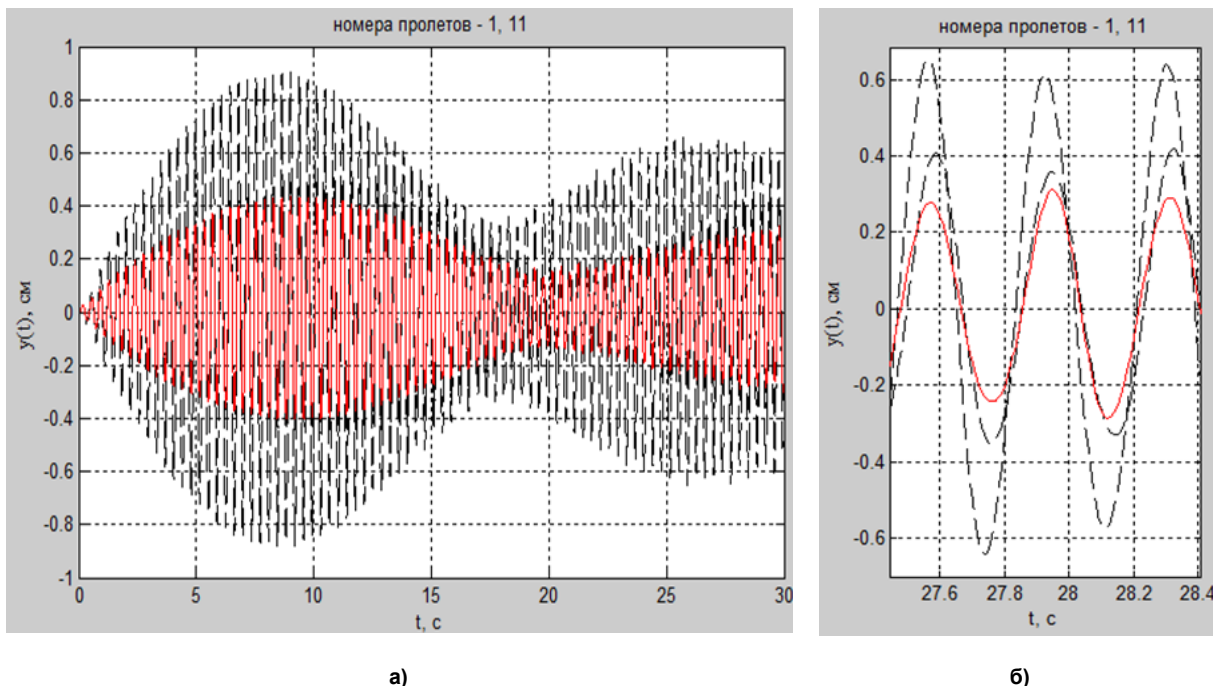


Рис. 6. Осциллограмма перемещений средних сечений первого и последнего пролетов расчетной модели: а – перемещения на интервале 30 с; б – фрагмент осциллограммы (красная кривая – по симметричной форме; пунктир – по кососимметричной форме)

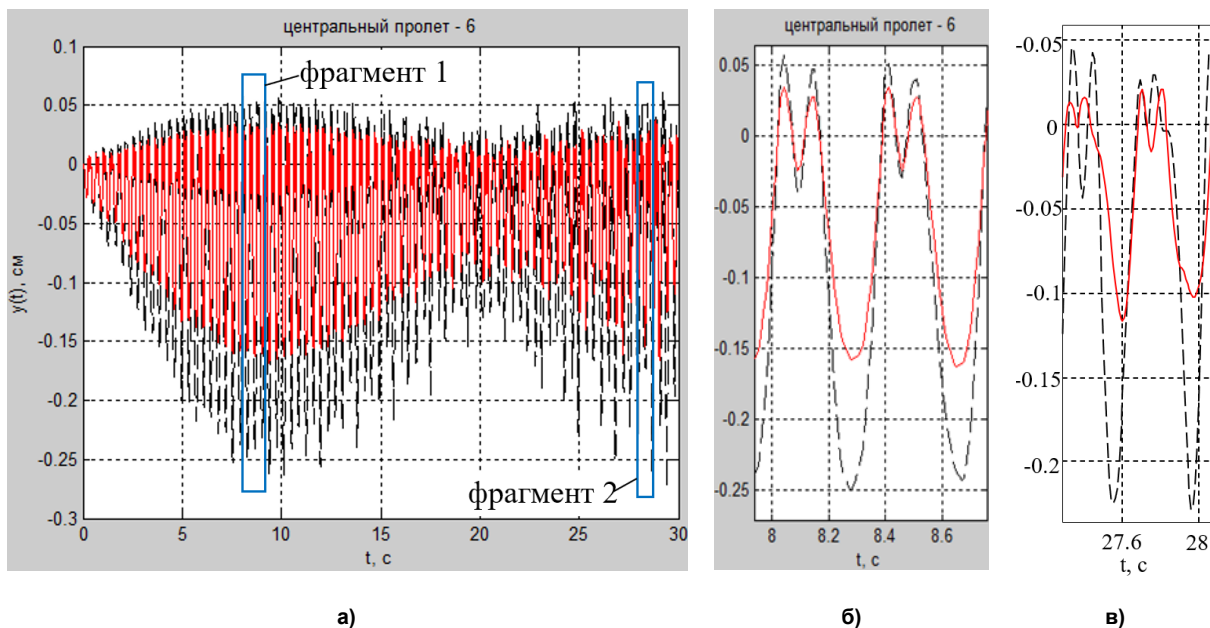


Рис. 7. Осциллограмма перемещений точки крепления троса в середине центрального пролета: а – перемещения на интервале 30 с; б, в – фрагмент 1 и 2 (красная кривая соответствует симметричной форме; пунктир – кососимметричной форме)

меньше соответствующих амплитуд пунктирных кривых.

Аналогичная картина наблюдается в тросе в моменты его натяжения, когда расчетная модель находится в состоянии МДС (рис. 8). Амплитуды растягивающих усилий в тросе, вычисленные

для варианта с симметричной формой деформирования оси балки (красная кривая), значительно меньше соответствующих амплитуд растягивающих усилий, полученных по кососимметричной форме деформирования оси расчетной модели.

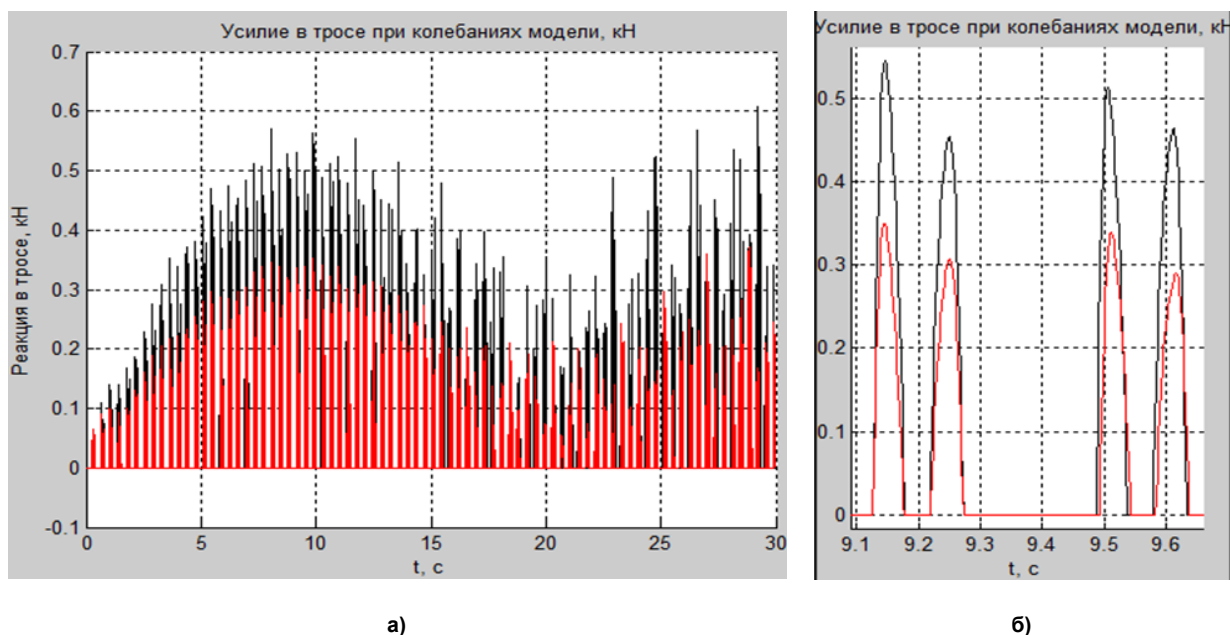


Рис. 8. Осциллограмма усилий в тросе расчетной модели: а – на интервале 30 с; б – фрагмент осциллограммы (красная кривая – по симметричной форме; черная кривая – по кососимметричной форме)

Заключение

Экспериментальным путем показано, что для модели «балка – трос», находящейся под действием вибрационной нагрузки, при натяжении троса упругая линия балки сохраняет симметричную форму колебания. На основании экспериментальных исследований предложена более совершенная математическая модель колебаний конструктивно-нелинейной системы «надземный газопровод – односторонняя связь». Согласно этой модели, динамическая реакция системы определялась для симметричной формы деформирования оси надземного газопровода во всех состояниях системы. Причем в выключенном состоянии ОС форма деформирования принималась по форме собственных колебаний, соответствующей основному тону БМ, а в состоянии включения ОС в работу системы форма деформирования принималась по собственной форме, соответствующей первому обертому МДС. Эффективность предложенной математической модели иллюстрируется на рассмотренном численном примере.

Выводы

1. Предложенная математическая модель колебаний обеспечивает более эффективную работу конструктивно-нелинейной системы «надземный газопровод – односторонняя связь» по сравнению с моделью, основанной на кососимметричной форме колебаний.

2. По оценкам прогибов, показано, что последние уменьшаются не только в центральном пролете, где установлена ОС, но и в соседних пролетах расчетной модели газопровода. Это позволяет для допустимого уровня предельных перемеще-

ний расширить границы протяженности расчетной модели за счет увеличения числа ее пролетов.

3. Открывается возможность для увеличения (оптимизации) шага расстановки устройств гашения колебаний по сравнению с вариантом расчета при кососимметричной форме колебаний, сокращения числа устройств на один километр трассы надземного газопровода и соответствующей экономии материалов и затрат, идущих на изготовление одного устройства гашения.

Литература

1. Бисплингофф, Р.Л. *Аэроупругость: монография* / Р.Л. Бисплингофф, Х. Эшли, Р.Л. Халфман. – М.: ИЛ, 1958. – 799 с.
2. Пановко, Я.Г. *Устойчивость и колебания упругих систем* / Я.Г. Пановко, И.И. Губанова. – М.: Изд-во Наука, 1967. – 420 с.
3. *Suppression of vortex-induced vibration of a circular cylinder by a passive-jet flow control* / Wen-Li Chen, Guan-Bin Chen, Feng Xu et al. // *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. – 2020. – Vol. 199. – P. 1–13.
4. *Three-dimensional vortex-induced vibrations of supported pipes conveying fluid based on wake oscillator models* / L. Wang, T.L. Jiang, H.L. Dai, Q. Ni // *Journal of Sound and Vibration*. – 2018. – Vol. 422. – P. 590–612.
5. Пат. RU 66000 U1, МПК F16L 55/033, F16L 3/00. *Устройство для гашения резонансных колебаний трубопровода* / А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярева и др. – № 2007109081/22; заявл. 12.03.2007, опубл. 27.08.2007.
6. Пат. RU 2699300 C1, МПК F16L 55/02, F16F 15/08. *Устройство подавления вибрации* /

И.Г. Ткаченко, С.Г. Шабля и др. – № 2018127117, заявл. 23.07.2018; опублик. 04.09.2019. Бюл. № 25.

7. Пат. RU 2550583 C1, МПК F16F 7/14. Амортизатор / М.А. Минасян, А.М. Минасян. – № 2014100557/11, заявл. 09.01.2014; опублик. 10.05.2015. Бюл. № 13.

8. Пат. RU 2533657 C1, МПК H02G 7/14. Гаситель вибрации / В.А. Антимонов, Б.М. Жуков и др. – № 2013128975/07, заявл. 26.06.2013, опублик. 20.11.2014. Бюл. № 32.

9. Пат. RU 2669981 C1, МПК F16L 55/035, F16L 3/11. Виброизолирующая подвеска трубопровода / Л.А. Акоюн, А.Ю. Бескровный и др. – № 2017137455, заявл. 25.10.2017, опублик. 17.10.2018. Бюл. № 29.

10. Пат. RU 2686957 C1, МПК F16L 55/02. Устройство подавления вибрации / И.Г. Ткаченко, С.Г. Шабля и др. – № 2018104385, заявл. 05.02.2018, опублик. 06.05.2019. Бюл. № 13.

11. Динамический расчет зданий и сооружений / М.Ф. Бернштейн, В.А. Ильичев, Б.Г. Коренев и др.; под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с.

12. Gabbai, R.D., Benaroya, H. An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders // *Journal of Sound and Vibration*. – 2005. – Vol. 282. – P. 575–616.

13. Казакевич, М.И. Аэродинамическая устойчивость надземных и висячих трубопроводов / М.И. Казакевич. – М.: Недра, 1977. – 200 с.

14. Потапов, А.Н. Динамический анализ дискретных диссипативных систем при нестационарных воздействиях / А.Н. Потапов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 167 с.

15. Дегтярева, Н.В. Построение аэродинамически устойчивой расчетной модели надземного газопровода с односторонней связью / Н.В. Дегтярева // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2009. – № 16 (149) – С. 23–28.

16. Потапов, А.Н. Временной анализ модели надземного газопровода с односторонними связями при аэродинамической неустойчивости / А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярева // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2009. – № 16 (149). – С. 23–28.

Потапов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), potapov.alni@gmail.com.

Тазеев Nail Тимурович, аспирант кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), tazeev.nail@gmail.com.

Амирова Регина Расимовна, магистрант кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), dgrayman@mail.ru.

Орлова Ольга Геннадьевна, магистрант кафедры «Строительное производство и теория сооружений», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), helga111294@mail.ru.

Поступила в редакцию 1 декабря 2020 г.

DOI: 10.14529/build210102

VIBRATION ANALYSIS OF AN ABOVE-GROUND GAS PIPELINE AT WIND RESONANCE

A.N. Potapov, potapov.alni@gmail.com

N.T. Tazeev, tazeev.nail@gmail.com

R.R. Amirova, dgrayman@mail.ru

O.G. Orlova, helga111294@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article considers an active method for damping wind self-sustained oscillations of an above-ground gas pipeline model, which allows the system to be tuned from the resonance frequency by changing its design scheme. The method consists in installing an oscillation damping device in one of the spans of the design model, functioning on the principle of one-way operation. A new mathematical model of oscillations with a symmetric deformation of the axis of the above-ground gas pipeline is proposed. The non-stationary dynamic process is realized within the framework of the theory of time analysis. Integration of the motion equation is performed in matrix form

for a system with a finite number of the degrees of freedom and taking into account internal friction. A numerical example is used to compare computational models with a symmetric and skew-symmetric natural mode of oscillation and show the effectiveness of the proposed approach with a symmetric shape.

Keywords: above-ground gas pipeline, self-sustained oscillations, oscillation damping device, one-way operation, natural mode of oscillation, stiffness matrix, displacement.

References

1. Bisplinghoff R.L., Eshli Kh., Khalfman R.L. *Aeroprugost'* [Aeroelasticity]. Moscow, IL Publ., 1958. 799 p.
2. Panovko Ya.G., Gubanova I.I. *Ustoychivost' i kolebaniya uprugikh sistem* [Stability and Vibrations of Elastic Systems]. Moscow, Izd-vo Nauka Publ., 1967. 420 p.
3. Wen-Li Chen, Guan-Bin Chen, Feng Xu, Ye-wei Huang, Dong-Lai Gao, Hui Li. [Suppression of Vortex-Induced Vibration of a Circular Cylinder by a Passive-Jet Flow Control]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 2020. vol. 199, pp. 1–13.
4. Wang L., Jiang T.L., Dai H.L., Ni Q. [Three-Dimensional Vortex-Induced Vibrations of Supported Pipes Conveying Fluid Based on Wake Oscillator Models] *Journal of Sound and Vibration*, 2018, vol. 422, pp. 590–612.
5. Potapov A.N., Degtyareva N.V. *Ustroystvo dlya gasheniya rezonansnykh kolebaniy truboprovoda* [Pipeline Resonance Damping Device]. Patent RU 66000 U1, 2007.
6. Tkachenko I.G., Shablya S.G., Tvardiyevich S.V., Bachalov S.V., Shatokhin A.A., Tyulyukin O.D., Kis-lun A.A., Shabrov S.N., Shabrov P.N. *Ustroystvo podavleniya vibratsii* [Vibration Suppression Device]. Patent RU 2699300 C1, 2018.
7. Minasyan M.A., Minasyan A.M. *Amortizator* [Damper]. Patent RU 2550583 C1. 2014.
8. Antimonov V.A., Zhukov B.M., Karasev N.A., Kranov V.B., Yudanov E.A. *Gasitel' vibratsii* [Vibration damper]. Patent RU 2533657 C1, 2013.
9. Akopyan L.A., Beskrovnyy A.Yu., Vakulov P.S., Ganzha A.A. *Vibroizoliruyushchaya podveska truboprovoda* [Vibration-Isolating Pipeline Suspension]. Patent RU 2669981 C1, 2017.
10. Tkachenko I.G., Shablya S.G. et al. *Ustroystvo podavleniya vibratsii* [Vibration Suppression Device]. Patent RU 2686957 C1, 2018.
11. Bernshteyn M.F., Il'ichev V.A., Korenev B.G. (Ed.), Rabinovicha I.M. (Ed.). *Dinamicheskii raschet zdaniy i sooruzheniy* [Dynamic Calculation of Buildings and Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 303 p.
12. Gabbai R. D., Benaroya H. [An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, vol. 282, pp. 575–616.
13. Kazakevich M.I. *Aerodinamicheskaya ustoychivost' nadzemnykh i visyachikh truboprovodov* [Aerodynamic Stability of Overhead and Overhead]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 200 p.
14. Potapov A. N. *Dinamicheskii analiz diskretnykh dissipativnykh sistem pri nestatsionarnykh vozdeystviyakh* [Dynamic Analysis of Discrete Dissipative Systems under Nonstationary Influences]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2003. 167 p.
15. Degtyareva N.V. [Construction of an Aerodynamically Stable Computational Model of an Elevated Gas Pipeline with a One-Way Connection]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2009, no. 16 (149), pp. 23–28. (in Russ.)
16. Potapov A.N., Degtyareva N.V. [Time Analysis of a Model of an Elevated Gas Pipeline with One-Way Connections in Case of Aerodynamic Instability]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2009, no. 16 (149), pp. 23–28. (in Russ.)

Received 1 December 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Анализ колебаний надземного газопровода при ветровом резонансе / А.Н. Потапов, Н.Т. Тазеев, Р.Р. Амирова, О.Г. Орлова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 13–21. DOI: 10.14529/build210102

FOR CITATION

Potapov A.N., Tazeev N.T., Amirova R.R., Orlova O.G. Vibration Analysis of an Above-Ground Gas Pipeline at Wind Resonance. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021, vol. 21, no. 1, pp. 13–21. (in Russ.). DOI: 10.14529/build210102