

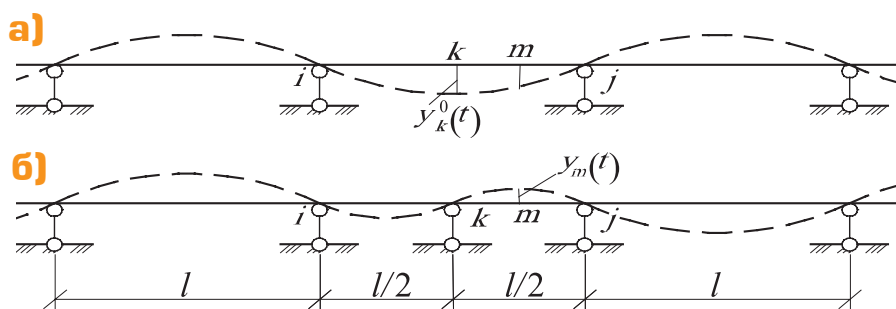
А.Н. Потапов, проф. (Южно-Уральский государственный университет);

А.А. Немелкова, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

## К ВОПРОСУ ОБ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НАДЗЕМНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

*В практике эксплуатации надземных газопроводов, находящихся под интенсивным ветровым воздействием, во многих случаях имеет место так называемая аэродинамическая неустойчивость [1], проявляющаяся в способности сооружения к раскачиванию перпендикулярно направлению ветрового потока. Нестационарные аэродинамические силы трудно поддаются аналитическому описанию и зависят от числа Рейнольдса  $Re$ . Наибольшую опасность для конструкции газопровода представляют режимы работы, связанные с областями:  $Re \in [300, 2 \cdot 10^5]$ ,  $Re > 5 \cdot 10^6$ . Для этих режимов характерно образование вихревого периодического следа с преобладающей частотой отрыва вихрей.*

Поочередное отделение вихрей с двух сторон от цилиндрической поверхности трубы приводит к возникновению на ее верхней и нижней части периодической подъемной силы, действующей поперек потока. Это служит причиной появления вынужденных вертикальных колебаний газопровода. Чем ближе частота  $\epsilon$  возмущающей силы к частоте основного тона (или к любой собственной частоте из нижней области спектра  $\omega_i$ ), тем выше опасность такого режима раскачивания конструкции. При совпадении частот  $\theta = \omega$ , наступает ветровой резонанс. Если система находится в этом режиме достаточно долго, то ее колебания могут перейти в необратимую фазу, ведущую к разрушительным последствиям.



**Рис. 1.** Расчетная динамическая модель надземного газопровода  
а) основная система (ОС) без односторонней связи;  
б) система с односторонней связью (СОС).

В связи с этим первоочередной задачей является проведение исследований, направленных на разработку мероприятий по повышению аэродинамической устойчивости газопроводов. Известные в литературе аэродинамические способы ограничения (гашения) колебаний в

ветровом потоке [1,2] применительно к конструкциям надземных газопроводов оказываются либо непригодными, либо малоэффективными. Ниже предлагается подход к решению данной проблемы, основанный на использовании односторонних связей.

Расчетная динамическая модель (РДМ) газопровода представлена в виде многопролетной неразрезной балки (рис. 1, а). Данную модель газопровода будем называть основной системой (ОС). Установим в одном из пролетов ОС (между  $i$ -й и  $j$ -й опорами) дополнительную опору, выполненную по типу односторонней связи (опора  $k$  на рис. 1, б). Такая система с дополнительной опорой будет называться системой с односторонней связью (СОС).

Схематическое изображение односторонней связи представлено на рис. 2. В средней части пролета труба 1 крепится посредством хомута 2 и троса 3 к бетонному блоку 4, установленному на грунтовое основание. Длина троса выбирается из такого условия, чтобы

в проектном положении трубы (когда колебания газопровода отсутствуют) трос был строго прямолинейным, т.е. не был ослаблен и в то же время не был излишне натянут. Растягивающее усилие в тросе в таком состоянии должно быть равно нулю.

Работа односторонней связи состоит в следующем.

Пусть в пролете, где установлена односторонняя связь, аэродинамическое возмущение направлено вниз. В этом случае связь (ввиду ослабления троса) не препятствует смещениям трубы, и она деформируется в соответствии с расчетной схемой ОС (рис. 1, а). Это положение трубы и троса изображено пунктиром на Рис. 2. При нестационарном возмущении, направленном

вверх, труба при обратном движении вызывает натяжение троса, включая одностороннюю связь в работу. Это приводит к изменению расчетной схемы газопровода, и труба начинает деформироваться как система с дополнительной опорой (рис. 1, б). При повторном движении трубы вниз РДМ снова работает по схеме ОС и т.д.

Таким образом, для РДМ, построенной на основе СОС, характерно два возможных состояния, циклически сменяемых друг друга в процессе вынужденных колебаний. Следует отметить, что каждое такое состояние имеет свой режим работы, определяемый внутренними динамическими параметрами системы. Важно выяснить, как циклические переходы из одного



## Томографик УД4-Т

### Многофункциональный дефектоскоп нового поколения

- Частотный диапазон с плавной регулировкой от 0,4 до 10 МГц;
- Два независимо - управляемых строга (А и В);
- Автоматическое или ручное построение кривой ВРЧ (до 256 точек);
- Два вида представления сигналов: **Детектированный** и **Радио**;
- Построение и обработка А, В и D (ТОFD) разверток;
- Режимы: **огibaющей**, **заморозки**, **отображения хода луча**, **zoom**;
- **Оценка конфигурации и размеров дефектов** по томографическому изображению;
- Автоматическое **определение скорости УЗК** и задержки в призме;
- Система слежения за **акустическим контактом**.

#### Встроенные УЗ приложения:

**Приложения общего назначения:**

- "Томографик 1.1." - ультразвуковой дефектоскоп;
- "Томографик 1.2." - УЗ толщиномер (0,2 мм ... 700 мм);
- "Томографик 1.3." - газуртизация ПЭП (АРД диаграммы).

**Железнодорожные приложения:**

- "Томографик 2.1." методика контроля колесных пар вагонов в соответствии с РД 07.09 97;
- "Томографик 2.2." методика контроля червяковых осей в соответствии с РД 32.144 200;
- "Томографик 2.3." - методики контроля деталей локомотивов.

**Авиационные приложения:**

- "Томографик 3.1." - резонансный дефектоскоп (0,2 ... 1,0 МГц);
- "Томографик 3.2." - акустический тензометр (определение степени затяжки резьбовых деталей).

**Группа сервисных приложений:**

- "FlashPlayer", "Калькулятор".

**Питание:** 220V/ 50Hz/10 W  
**Батарея:** Li-on, мониторинг, автоподзарядка  
**Цветной TFT дисплей:** 320x240 dpi  
**Интерфейс:** RS 232, IrDA, Ethernet

**Работа от батарей:** не менее 10ч  
**Размеры:** 125x210x85 мм  
**Масса:** с батареей 2,2 кг  
**Климатика:** IP54, -20/+50 °C

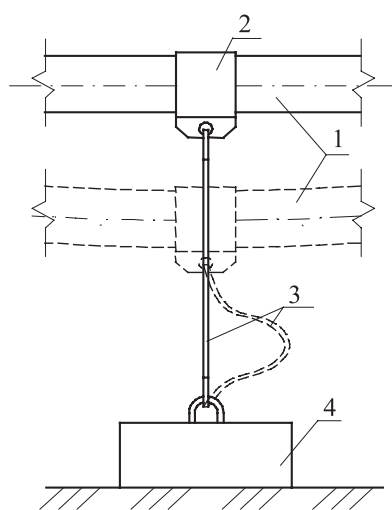


**Гибкая ценовая политика, доверительные условия сотрудничества**

Москва, 125167, Головинские ш., д. 8/2, оф. 210,  
 тел/факс: +7(095) 618-94-32, 995-11-01, market@votum.ru

Кишинев, MD2038, ул. Дечебал, 76,  
 тел/факс: (+373 22) 56-00-47, 56-00-48, office@votum.md

[www.votum.ru](http://www.votum.ru)



**Рис. 2.** Схематическое устройство одной стороны связи  
1 – труба газопровода; 2 – хомут; 3 – трос;  
4 – бетонный блок.

состояния РДМ в другое влияют на повышение аэродинамической устойчивости газопровода.

Рассмотрим случай, когда частотные

параметры возмущающей аэродинамической силы и РДМ газопровода, работающей по схеме ОС, совпадают между собой. В качестве примера можно выбрать режим движений с наименьшей собственной частотой ОС -  $\omega_1$ . Тогда  $\theta = \omega_1$  и при выключенной одной стороне связи вынужденные колебания СОС совершаются с периодом  $T_0 = 2\pi/\omega_1$  (рис. 3). После одного полуцикла колебания (при  $t_1$ ) происходит включение одной стороны связи, сопровождающееся скачкообразным ростом параметров жесткости РДМ. Этот процесс перехода через критическую точку  $t_1$  связан с возрастанием частотного спектра:  $\omega_1, \omega_2, \dots$ , для любой частоты которого справедливо  $\omega_i > \omega_1$ , где  $\omega_i, \omega_1$  -  $i$ -е собственные частоты спектров системы с дополнительной связью и ОС соответственно. Поэтому следующий полуцикл колебания СОС будет происходить по низшей форме с периодом  $T_1 = 2\pi/\omega_1$  несколько меньшим  $T_0$  ( $T_1 < T_0$ ). Полный цикл колебания СОС

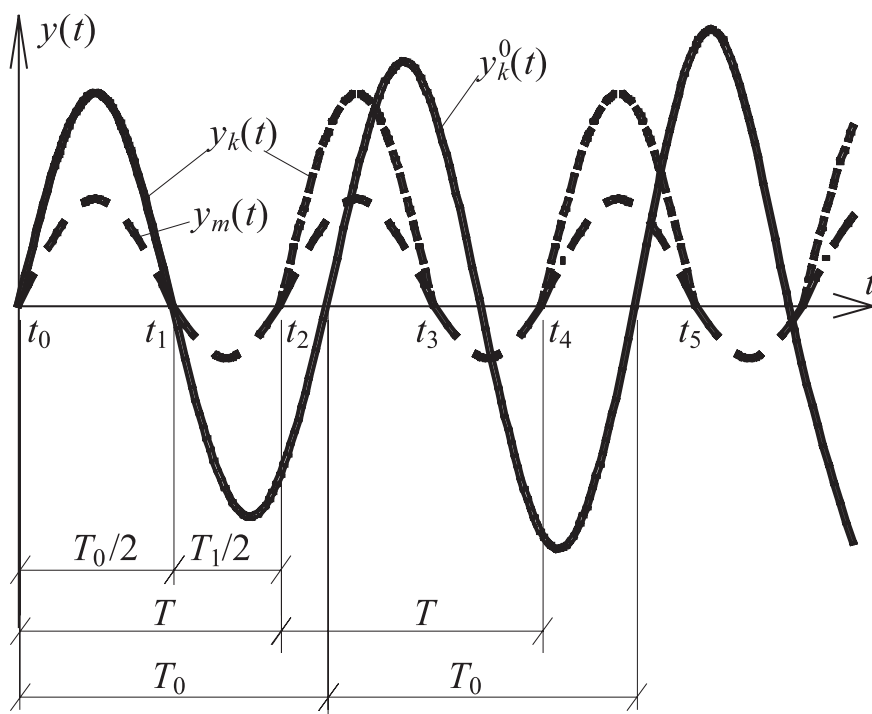
будет соответствовать периоду  $T = (T_0 + T_1)/2$ .

Особенность работы СОС в условиях ветрового резонанса показывают осциллограммы перемещений различных точек трубы (рис. 3). Для вынужденных колебаний ОС характерен рост амплитуд во времени (кривая перемещений  $y_k^0(t)$ ), обусловленный совпадением частот ( $\theta = \omega_1$ ). Для СОС амплитудные значения на кривых перемещений  $y_k(t), y_m(t)$  уже не увеличиваются с течением времени. Объяснение этого факта состоит в следующем.

При переходах через критические точки  $t_1, t_3, t_5, \dots$  вследствие включения одной стороны связи в работу РДМ преобразуется из ОС в систему с повышенной жесткостью. По этой причине на отрезках времени  $t \in [t_1, t_2], [t_3, t_4], \dots$  низшая собственная частота СОС подчиняется условию:  $\omega_1 > \omega_1^0$ . В силу своего возрастания частота  $\omega_1$  уже не совпадает с возмущающей частотой  $\theta$  ( $\omega_1 > \theta$ ). Поэтому на данных интервалах времени РДМ находится в режиме движения, характеризуемом шириной дорезонансной зоны  $h = \omega_1 - \theta$ . Очевидно, что аэродинамическая устойчивость системы зависит от величины  $h$ , и она будет тем выше, чем больше ширина дорезонансной зоны.

Таким образом, периодическое включение в работу и выключение из работы одной стороны связи приводит к подавлению низшей собственной формы ОС в течение второй половины каждого периода вынужденных колебаний СОС. Поскольку процесс подавления основного тона происходит в каждом цикле колебаний, то амплитуды вынужденных колебаний трубы газопровода испытывают постоянные ограничения при резонансе, что не допускает его развития во времени и предопределяет эффективность предлагаемого подхода.

Заметим, что постановка одной дополнительной связи позволяет снизить



**Рис. 3.** Осциллограммы перемещений РДМ надземного газопровода при резонансе

- перемещение точки k в ОС –  $y_k^0(t)$ ;
- то же – в СОС –  $y_k(t)$ ;
- перемещение точки m в СОС –  $y_m(t)$ .



опасные границы колебаний только для некоторой локализованной области газопровода, включающей несколько смежных пролетов. За пределами этой области опасность возникновения резонанса будет, по-прежнему, оставаться высокой, так как надземные газопроводы по своей длине имеют большую протяженность, а ветровые нагрузки действуют на значительном по ширине фронте (до нескольких километров). Для полного исключения ветрового резонанса необходима установка односторонних связей по всей трассе газопровода. Решение этого вопроса требует учета влияния многих факторов: сил внутреннего трения материала трубы, конструкционного демпфирования, физических и кинематических параметров воздушной среды и ряда других. Эффективное решение задачи по выбору оптимального шага расстановки односторонних связей может быть получено в рамках нового метода [3], основанного на временном анализе динамической реакции диссипативных систем и позволяющего строить решение в замкнутом виде при сложных нестационарных воздействиях.

В заключение отметим, что предложенный способ ограничения колебаний, основанный на принципе циклической работы односторонних связей, требует диагностирования конструкции газопровода. Эта мера необходима для того, чтобы не допустить нежелательного эффекта «разбалтывания» связей, устанавливаемых с расчетным шагом по длине газопровода. Эффект «разбалтывания» может происходить по ряду причин: из-за вытяжки петель бетонных блоков, хомутов или тросов, что в итоге приводит к снижению основного тона РДМ. Для обеспечения постоянного контроля по натяжению тросов необходимо делать регулярные замеры амплитудно-частотных характеристик, начиная с момента возведения газопровода и продол-

	<p><b>Вихретоковый дефектоскоп портативный ГАЛС (ВД-103)</b></p> <p>Рабочая частота: до 6 МГц Мин. размеры трещин: глубина: 60 мкм длина 1.5 мм</p>		<p><b>Измеритель влажности нефтепродуктов ИВН-2002</b></p> <p>Диапазон измерения: 0...20%</p>
	<p><b>Вихретоковый дефектоскоп портативный ВД-2</b></p> <p>Рабочая частота: до 2МГц Мин. размеры трещин: ширина: 10 мкм глубина: 100 мкм длина: 0.6 мм</p>		<p><b>Многоканальный измеритель диэлектрической проницаемости МИ-5</b></p> <p>Диапазон измерения: 1...100 отн. ед. Кол-во каналов: 256</p>
	<p><b>Вихретоковый измеритель удельной электрической проводимости ВЗ-2002</b></p> <p>Диапазон измерения: твердые тела: 0.1...60 См/м жидкости: 0.01...10 См/м</p>	<p><b>ГлавДиагностика</b> General Diagnostics «Всё, что вы хотели узнать об объекте...»</p> <p>105203, Москва, Нижний Журавлев пер. д. 6А тел.: (095) 369-03-75, факс: (095) 369-03-75 http://www.defectoscope.ru, e-mail: info@glavd.ru</p>	

жая их в процессе эксплуатации. На практике снятие основной частоты и амплитуды виброперемещений выполнялось с помощью прибора для измерения вибрации «Вибротест-4МГ+» (СКБ Стройприбор, г. Челябинск), дающего хорошую чувствительность в условиях ветрового резонанса.

**Литература:**

1. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия // Справочник проектировщика.- М.: Стройиздат, 1981. - 216 с.
2. Справочник по динамике сооружений // Под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича.- М.: Стройиздат, 1972. - 512.
3. Потапов А.Н. Динамический анализ дискретных диссипативных систем при нестационарных воздействиях. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. - 167 с.



**ГРУППА  
ГЛАГОЛ  
переводы**

**Горячая тематика переводов.**

**Большие объемы  
Сложные тексты  
Сжатые сроки**

Дубосековская ул., 5/6, Москва, 147580, Россия  
Тел.: +7 (095) 746-4827, факс: +7 (095) 730-0137  
http://www.gtg.ru, e-mail: info@gtg.ru