

## СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ВИСЯЧИХ ТРУБОПРОВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ

Розглянуто питання визначення власних частот висячих трубопровідних переходів з використанням розрахункової моделі у вигляді багатопроектної регулярної балки (труба) на пружних опорах (підвіски разом з кабелем). Приклад розрахунку дано у порівнянні з розрахунками іншими методами.

Рассмотрен вопрос определения собственных частот висячих трубопроводных переходов с использованием расчетной модели в виде многопролетной регулярной балки (труба) на упругих опорах (подвески вместе с кабелем). Пример расчета дан в сравнении с расчетами другими методами.

The article is devoted to the question of defining own frequencies of trailing pipeline passages with the use of calculation model as a multi-span regular beam (pipe) on elastic supports (suspension brackets together with a cable). The example of calculation is given in comparison with calculations by other methods.

Интенсивное развитие нефтяной и газовой промышленности, разработка проектов транспортировки угля газом, горячей воды от ГЭС к потребителям и т. д. требует значительных капитальных вложений в строительство трубопроводного транспорта. Чаще всего для надземной прокладки трубопроводов в горных районах, через реки, овраги, ущелья, болота, дороги и др., с экономической и экологической точки зрения, целесообразным считается применение висячих систем различных видов [1–3; 9] и др.

Статический расчет таких систем разработан довольно хорошо, о чем свидетельствует обширная библиография по данному вопросу, приведенная в работах [1; 12–14]. Разработки динамического расчета с надежным аппаратом определения частот и форм собственных вертикальных и горизонтальных колебаний практически отсутствуют. Попытки проектировщиков перенести без каких-либо изменений решения, полученные для висячих мостов, на данные конструкции приводят зачастую к значительным погрешностям (в 2–3 раза) по частоте (особенно первой формы колебаний) в силу некорректности расчетных схем (особенно горизонтальных колебаний) или не учета отдельных важных факторов.

Небольшая жесткость и погонная масса балки жесткости (трубы) при значительных линейных размерах (длина пролета, длина панели, стрела провисания кабеля и т. д.) резко изменяют известные соотношения между параметрами при определении собственных частот колебаний.

Кроме того ошибки в определении собственных частот естественно порождают неточности в статическом расчете. Проблема заклю-

чается в том, что данные неточности статического расчета остаются не замеченными, поскольку проверкой правильности динамического расчета в большинстве случаев может служить только эксперимент на натурном объекте, т. е. только как констатация факта.

Именно указанные неточности динамического расчета породили целый раздел динамики – гашение колебаний различного рода конструкций, в том числе и мостовых. Необходимость в таких действиях могла бы отпасть, если при проектировании возможно было бы строго выполнить ограничения по периодам собственных колебаний, заложенные в нормативных документах [15] и др.

В приложении к работе [1] приведены схемы около сорока построенных и проектируемых трубопроводных переходов висячего типа. Рассмотрим наиболее распространенный цепной тип висячего трубопровода с одной фермой (рис. 1).

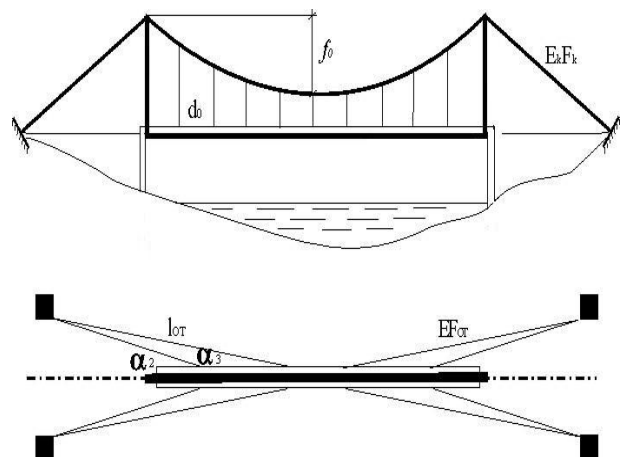


Рис. 1. Схема цепного висячего трубопровода с одной фермой

С целью получения решений для собственных частот и форм колебаний конструкций данного типа использована расчетная модель для однопролетного гибкого висячего моста в виде многопролетной неразрезной балки (труба) на промежуточных упругих опорах (кабель вместе с подвесками) [5; 6]. С учетом особенностей данной конструкции рассмотрены отдельно вертикальные и горизонтальные колебания.

Решение для собственных частот вертикальных колебаний может быть получено по формуле (1)

$$\omega_i = \lambda_i^2 \sqrt{\frac{E_m I_m}{\mu d_0^4} + \frac{H_0}{\lambda_i^2 \mu d_0^2}}. \quad (1)$$

Данная формула в отличие от предлагаемой в работе [4] кроме жесткостных характеристик и распора (подкоренное выражение) учитывает и «подвешивание» балки жесткости к кабелю, что практически достигается путем замены частотного параметра  $\beta_i = \frac{\pi i}{n}$  параметром  $\lambda_i$

( $\lambda_i^4 = \frac{\mu \omega_i^2 d_0^4}{EI}$ ), который определяется по графику – номограмме [6] или путем решения частотного уравнения (2), которое описывает колебания многопролетной регулярной неразрезной балки на промежуточных упругих опорах

$$\frac{sh\lambda_i}{ch\lambda_i - \cos\beta_i} - \frac{\sin\lambda_i}{\cos\lambda_i - \cos\beta_i} = \frac{2\lambda_i^3}{c'}, \quad (2)$$

Жесткость промежуточной опоры  $c_0$  и ее относительная жесткость  $c'$  определяется по тем же зависимостям, что и для однопролетного гибкого висячего моста [5]

$$c' = \frac{c_0 d^3}{2E_m I_m}, \quad c_0 = \frac{ql}{2f_0}. \quad (3)$$

Анализ реально разработанных и выполненных проектов большого числа трубопроводов показывает, что большинство исследователей в качестве «нулевого» приближения для первых трех частот принимают известную простую зависимость (4) [4], при  $\lambda_i = \beta_i$  в (1), т. е. без учета «подвешивания» балки к кабелю.

$$\omega_i = \beta_i^2 \sqrt{\frac{E_n I_n}{\mu d_0^4} + \frac{H_0}{\mu d_0^2 \beta_i^2}}, \quad (4)$$

Именно в связи с тем, что в ней не учтено «подвешивание» балки жесткости к кабелю, автор [4] рекомендует ее как «нулевое» приближение, поскольку для приведенных в его

работе трех примеров висячих мостов, «нулевое» приближение отличается от полученного затем после нескольких приближений действительного значения соответственно в 10, 40 и 6 раз.

Кроме того, при  $i=1,2$  первый член подкоренного выражения для трубопроводов очень мал по сравнению со вторым (2...9 %) в силу незначительной величины момента инерции трубы и таким образом балка жесткости (труба) выпадает из расчета и уже этот факт должен насторожить проектировщика.

Однако обоснованно пренебрегая им можно получить значительно более простую формулу «нулевого» приближения для круговой частоты первых двух форм

$$\omega_i = \frac{\pi i}{2} \sqrt{\frac{g}{2f_0}}, \quad \omega_i^2 = \frac{\pi^2 i^2}{8} \cdot \frac{g}{f_0} = \frac{12,1 \cdot i^2}{f_0}. \quad (5)$$

Данная зависимость имеет тот положительный момент, что она дает верное значение частоты по второй форме (кососимметричная форма) и однозначно выделяет основной параметр висячей системы, от которого зависит частота – стрела провисания кабеля  $f_0$ . Использовать формулы (4) и, что равносильно, (5) для определения частот симметричных форм колебаний (особенно первой) в реальном проектировании можно лишь как «нулевое приближение», что будет показано ниже.

В данном направлении имеются разработки [1; 4; 7; 8; 11] и др.

В качестве примера, использования предлагаемых автором решений и зависимостей для определения собственных вертикальных и горизонтальных колебаний висячих трубопроводов, в табл. 1 приведены параметры трубопровода, для которого в работе [1] выполнен динамический расчет.

Из параметров, не вошедших в табл. 1 можно отметить:

- по трубам проложен смотровой мостик со сплошным настилом;
- грунты основания имеют следующие характеристики:  $\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$ ,  $\varphi = 40^\circ$ ,  $R^H = 3,0 \text{ кг/см}^2$ ;
- собственный вес каната  $q_1 = 32 \text{ кг/м}$ .

Результаты расчета частот собственных вертикальных колебаний по предлагаемой методике приведены в табл. 2 в сравнении с данными расчета по методике А. В. Червякова [4], приближенным формулам В. А. Смирнова [7], по методике принятой в работе [1], методике А. В. Брагина, описанной им в [11] (в применении к висячим цепным мостам) и приближенной формуле (5).

Таблица 1

Характеристика трубопровода	Обозначение	Величина
Длина перехода, м	$l$	200,0
Длина панели, м	$d_0$	10,00
Число панелей	$n$	20
Расстояние между оттяжками, м	$l_1$	40,00
Количество оттяжек	$n_1$	4
Угол наклона вертикальных оттяжек	$\alpha_1$	27° 30'
Углы наклона горизонтальных оттяжек	$\alpha_2$	45° 00'
	$\alpha_3$	26° 30'
Диаметр трубы, мм	$D$	529×9
Площадь сечения трубы, см <sup>2</sup>	$F_m$	147,0
Момент инерции трубы, см <sup>4</sup>	$I_m$	50000
Момент сопротивления трубы, см <sup>3</sup>	$W_m$	1885
Диаметр каната, мм	$D_k$	63×2
Площадь сечения каната и оттяжек, см <sup>2</sup>	$F_k, F_{o,m}$	36,7
Модуль упругости каната и оттяжек	$E_k, E_{o,m}$	1,77
Оттяжек, МПа		15·10 <sup>4</sup>
Диаметр оттяжек, мм	$d_{o,m}$	19,5
Длина оттяжек, м	$l_{o,m}$	89,4
		56,5

Таблица 2

Методика расчета или формула	Круговая частота, Гц	
	1 форма	2 форма
По приближенным формулам В. А. Смирнова [7]	3,734	1,623
По формуле работы В. И. Киреевко [1]	0,787	1,631
По приближенной формуле [5]	0,777	1,554
По методике А. В. Червякова [4]	3,762	1,574
По методике автора с учетом «подвешивания» трубы к кабелю	3,821	1,562
По методике А. В. Брагина [11]	2,642	1,631

Предлагаемые автором решения дают надежные удовлетворительные результаты, поскольку практически совпадают с расчетами по двум другим известным методикам. Проектировщика должна привлекать сравнительная простота предлагаемой методики по следующим причинам: формулы В. А. Смирнова, А. В. Брагина довольно громоздки, а удовле-

творительный результат по методике А. В. Червякова получаем после нескольких последовательных приближений, в то время как по предлагаемой методике решения для частот имеют вид аналогичный формулам «нулевого» приближения, а частотный параметр легко определяется по графику-номограмме или по уравнению (2). Основным же достоинством такого

подхода является возможность при проектировании довольно легко увязывать параметры сооружения с периодом колебаний или, задавшись периодом, определить остальные параметры сооружения, которые будут удовлетворять условиям прочности, жесткости и автоматически исключать возможность нежелательных вибраций.

Если учесть, что критическая скорость ветра, при которой возможно создание вертикальных вибраций ( $V_{кр}$ ), максимальное амплитудное значение аэродинамической нагрузки ( $F_0$ ) и резонансная амплитуда колебаний трубы напрямую зависят от частоты (периода)

$$V_{кр} = \frac{5d}{T}, \quad F_0 = \frac{V_{кр}^2 \cdot d}{64}, \quad (6)$$

то нетрудно видеть насколько важно иметь надежный аппарат для определения собственных частот рассматриваемой висячей системы. В приведенном примере при расчете по предлагаемой автором [1] методике неверный результат по первой частоте привел к занижению значения интенсивности аэродинамической нагрузки в 4 раза и во столько же раз занижил резонансную амплитуду колебаний трубы, вызываемую указанной аэродинамической нагрузкой.

Предлагаемая методика определения собственных частот трубопровода в горизонтальной плоскости незначительно отличается от приводимой методики для вертикальных колебаний. Оттяжки, являясь упругими опорами для трубы в горизонтальном направлении, имеют жесткость, вычисляемую по простой зависимости

$$c_0 = \frac{EF_{o,m}}{l_{o,m}} \sin \alpha_i, \quad (7)$$

и относительную жесткость

$$c' = \frac{E_{o,m} F_{o,m} \cdot l_1^3}{l_{o,m} 2E_m I_m} \sin \alpha_i, \quad (8)$$

и позволяют применить аналогичную расчетную схему в виде неразрезной регулярной многопролетной балки на упругих опорах.

В работе [1] жесткость оттяжек принята равной бесконечности, аналогичная рекомендация дана и в работе [10]. Ни в первой, ни во второй работе обоснование данной рекомендации не дано. В действительности такое допущение легко доказывается лишь в одном случае, если колебания происходят по  $n$ -ой форме.

Для рассматриваемого выше примера, подставляя указанные данные в формулу (7), в дей-

ствительности имеем величину жесткости оттяжек очень далекую от бесконечности ( $c_0 = 33,1 \text{ т/м}$  и  $26,3 \text{ т/м}$ ) и тем более значение относительной жесткости ( $c' = 100,8$  и  $79,5$ ), которая и фигурирует в динамических расчетах.

Данное обстоятельство не может не повлиять на точность результата при определении собственной частоты для форм колебания отличных от  $n$ -ой, что легко проверяется. По графику-номограмме или по уравнению (2) находим для

$$i=1 \quad \text{при} \quad c' = 100,8 \quad \lambda_1^2 / 2\pi = 1,95$$

$$c' = 79,5 \quad \lambda_1^2 / 2\pi = 1,76$$

$$i=1 \quad \text{при} \quad c' = \infty \quad \lambda_1^2 / 2\pi = 3,30$$

и погрешность замены упругих оттяжек абсолютно жесткими при определении частоты составляет 69,2 и 87,5 %, что ведет за собой более грубые ошибки, поскольку неверно определенные собственные частоты в горизонтальной и вертикальной плоскости привели к неверным выводам об устойчивости сооружения в целом.

Следовательно, расчетная схема трубопровода в горизонтальной плоскости – регулярная балка на упругих опорах, а не на жестких.

Подводя итог, можно констатировать, что предлагаемая методика приемлема для определения частот как вертикальных, так и горизонтальных колебаний висячих трубопроводных переходов поскольку дает стабильные результаты, подтверждаемые и экспериментами, и расчетами по другим методикам.

Кроме того, такой подход позволяет вести проектирование методом «обратного хода» [16], при котором проектирование ведется от частоты (периода).

Исходными данными при проектировании могут быть как минимум два параметра: длина трубопровода и диаметр трубы. Третий параметр известен из нормативных документов – период собственных колебаний, т. е. диапазон в который он не должен попадать. Задавшись им вне пределов данного диапазона, находим критическую скорость ветра, максимальное амплитудное значение аэродинамической нагрузки и резонансную амплитуду колебаний трубы.

По значению круговой частоты по второй форме по приближенной формуле (5) находим стрелу провисания кабеля, далее интенсивность постоянной нагрузки и т. д., продвигаясь к формуле (1), из которой уточняем жесткость трубы, длину панели.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Киреенко В. И. Висячие трубопроводные переходы / В. И. Киреенко, В. Н. Шимановский, Д. А. Коршунов, Ю. В. Смирнов. – К.: Будівельник, 1968, – 158 с.
2. Петров И. П. Надземная прокладка трубопроводов / И. П. Петров, В. В. Спиридонов. – М.: Недра, 1965.
3. Гольдштейн А. С. Висячие и арочные переходы нефтепроводов / А. С. Гольдштейн, В. И. Киреенко. – М.: Недра, 1964.
4. Червяков А. В. Приближенный метод определения собственных частот и форм вертикальных колебаний висячих мостов // Сб. науч. статей ВНИИ трансп. стр-ва, вып. 8. – М., 1963.
5. Солдатов К. И. К вопросу о собственных частотах колебаний мостовых конструкций на упругих опорах // Вопросы прикладной теории колебаний: Сб. науч. тр. / ДИИТ. – Д., 1972. – Вып. 116. – С. 97–119.
6. Солдатов К. И. Свободные колебания регулярных балок и некоторых мостовых конструкций на упругих опорах: Дис. ... канд. техн. наук, – Д., 1971. – 220 с.
7. Смирнов В. А. Висячие мосты больших пролетов. – М.: Высш. шк., 1970. – С. 288–350
8. Червяков А. В. Некоторые задачи динамики висячих мостов: Дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 1964.
9. Киреенко В. И. Конструкция воздушных переходов магистральных трубопроводов // Промышленное строительство и инженерные сооружения. 1960. № 5.
10. Гольденблат И. И. Справочник по расчету строительных конструкций на устойчивость и колебания / И. И. Гольденблат, А. М. Сизов. – М.: Стройиздат, 1952.
11. Качурин В. К. Проектирование висячих и вантовых мостов / В. К. Качурин, А. В. Брагин, Б. Г. Ерунов. – М.: Транспорт, 1971. – С. 184–194.
12. Киреенко В. И. Конструктивные решения и расчет висячих и арочных переходов // Строительство трубопроводов. 1962. № 8.
13. Киреенко В. И. Конструкция воздушных переходов магистральных трубопроводов // Промышленное строительство и инженерные сооружения. 1965. № 3.
14. Качурин В. К. Теория висячих систем (Статический расчет), – Л.–М.: Госуд. изд-во литер. по строит-ву. архит. и строит. материалам, 1962. – 223 с.
15. СНиП 2.05.03-84, Мосты и трубы. 1984.
16. Солдатов К. И. Некоторые вопросы определения собственных частот колебаний мостов применительно к проектированию // Вопросы статики и динамики мостов: Межв. сб. науч. тр. / ДИИТ. – Д., 1987. – С. 94–103.

Надійшла до редколегії 25.05.04.