

## Динамика конструкций и сооружений

### ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С КОНСТРУКТИВНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Г.В. ДЕНИСОВ, аспирант,

В.В. ЛАЛИН, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,

г. Санкт-Петербург, Богатырский пр., д. 25, к.1, кв. 209, [охохоx@mail.ru](mailto:охохоx@mail.ru)

*В статье рассматривается динамическое поведение подземного участка трубопровода с конструктивным включением. Показано, что сейсмическое воздействие может привести к возникновению локальных колебаний конструктивного включения, при относительно покоящемся трубопроводе, что может быть определяющим фактором при обеспечении прочности сооружения.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** трубопровод, конструктивное включение, колебания, прочность.

Развитие трубопроводной системы и связанное с этим совершенствование технологий возведения и проектирования, применение новых материалов, строительство в сейсмически опасных районах, приводит к необходимости совершенствования расчетного аппарата.

Результаты обследований реальных подземных трубопроводов, перенесших землетрясение, позволяют заключить, что наиболее опасными с точки зрения обеспечения прочности при динамических воздействиях являются зоны примыкания к другим сооружениям или конструктивным включениям [1]. Это подтверждается рядом современных математических исследований. К, примеру, работы [2, 3].

Вместе с тем, следует отметить, что в действующих нормативных документах [4, 5] никак не регламентируется учет локальных конструктивных включений. В настоящей работе приведен способ учета данного фактора на основе теоретических исследований локализации колебаний [6].

Целью настоящей работы является развитие результатов указанных исследований [6] применительно к расчету подземных и наземных (в насыпи) трубопроводов на динамические воздействия. Следует оговориться, что автор в дан-

ной статье не ставит перед собой задачу разработки новой методики расчетов, так как это является темой отдельной работы, а только показывает возможность применения результатов исследований [6] при решении инженерных задач.

Согласно нормативному подходу [4, 5], расчет подземных магистральных трубопроводов на прочность при динамических воздействиях сводится к определению напряжений в конструкции вследствие ее деформации при прохождении сейсмических волн. Будем следовать подходу, изложенному в [7, 8]. Примем волновое уравнение, предложенное в [8], описывающее колебания трубопровода без учета проскальзывания по грунту:

$$y = D_{\max} \sin \omega \left( t - \frac{x}{V_s} \right), \quad (1)$$

где  $D_{\max}$  – максимальное смещение грунта при землетрясении,  $\omega$  – преобладающая круговая частота колебаний частиц грунта при динамическом воздействии,  $V_s$  – скорость движения фронта волны,  $t$  – время. Тогда, для описания изгибных деформаций трубопровода получаем:

$$\varepsilon = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = D_{\max} \left( \frac{\omega}{V_s} \right)^2 \sin \omega \left( t - \frac{x}{V_s} \right), \quad (2)$$

здесь приведено выражение для абсолютного значения. Как видно, выражение (2) не учитывает наличие неоднородностей в конструкции.

Для исследования влияния локального включения на прочность подземного трубопровода при динамическом воздействии, рассмотрим прямолинейный участок сооружения с одним конструктивным включением. При этом указанную конструкцию будем схематизировать бесконечным стержнем (балкой) на упругом основании, а конструктивное включение – сосредоточенной массой (рис. 1). Для описания поведения балки примем наиболее часто используемую для большинства инженерных задач модель Бернулли-Эйлера. Данная схематизация в отличие от более сложных моделей не учитывает влияние инерции вращения (модель Рэлея) и деформации поперечного сдвига (модель Тимошенко) [9].

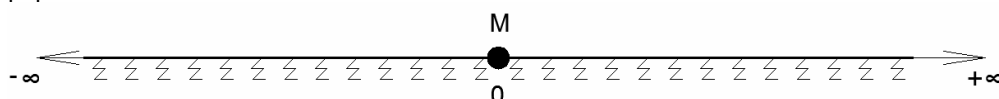


Рис. 1. Принятая схематизация участка трубопровода

Характерной особенностью подобных конструкций, как было показано в указанной выше работе [6], является наличие, при определенных условиях, собственных форм колебаний, обусловленных сосредоточенными массами.

Уравнение гармонических поперечных колебаний бесконечной балки Бернулли-Эйлера на упругом основании с круговой частотой  $\omega$  без учета сил трения, после отделения временного множителя  $\exp(i\omega t)$ , имеет вид [6]:

$$D \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + (k - m(x)\omega^2)u(x) = 0, \quad -\infty < x < \infty, \quad (3)$$

где  $D$  – изгибная жесткость балки ( $D = EI$ , где  $E$  – модуль упругости,  $I$  – момент инерции сечения),  $k$  – коэффициент жесткости упругого основания (коэффициент постели),  $m(x)$  – погонная масса. Выражение для  $m(x)$  имеет вид:

$$m(x) = m_0 + M\delta(x), \quad (4)$$

где  $m_0$  – погонная масса балки,  $M$  – масса локального включения,  $\delta(x)$  – дельта функция Дирака. За амплитуду колебаний балки примем заданное смещение  $u_1$  в точке расположения сосредоточенной массы ( $x=0$ ):  $u(0) = u_1$ .

В работе [6] вводится понятие «частоты отсечки» (граничная частота), характеризующее переход от дискретного спектра колебаний к сплошному спектру. Другими словами, наличие четко выраженных форм возможно только при частотах, не превышающих так называемую частоту отсечки  $\omega_b$ . При этом колебания с частотой равной  $\omega_b$  представляют собой смещения сооружения как единого целого.

В данном случае, как следует из (3), выражение для  $\omega_b$  имеет вид:

$$\omega_b = \sqrt{k/m_0} . \quad (5)$$

Так же в [6] показано, что для случая однородной балки, без массовых включений, при частотах меньше частоты отсечки не может быть колебаний. Другими словами, при низкочастотных сейсмических нагрузках, трубопровод теоретически представляет собой некий, относительно покоящийся «волновод» воспринимающий сейсмические волны.

Схожее разделение частотного диапазона можно встретить и в других работах [9, 10]. Так в [10], аналогичное понятие трактуется как «частотная область непроникновения волн», в которой колебания не могут распространяться по балке, а экспоненциально спадают.

Выражение для собственной формы колебаний  $u = \tilde{u}$  с соответствующей частотой  $\omega^*$  будем определять, применяя интегральное преобразование Фурье к соотношению (3) по  $x$ . В результате получим [6]:

$$\tilde{u}(x, \omega^*) = u_1 M \omega^{*2} G(|x|, \omega^*), \quad (6)$$

где  $G(|x|, \omega^*)$  – функция Грина балки, определяемая выражением [6]:

$$G(|x|, \omega^*) = \frac{1}{2Da^3} e^{-\frac{\sqrt{2}}{2} a|x|} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\sqrt{2}}{2} a|x|\right), \quad (7)$$

где  $a$  – некая константа:

$$a = \sqrt[4]{\frac{k - m\omega^{*2}}{D}} . \quad (8)$$

Собственная форма колебаний условно представлена на рис. 2.

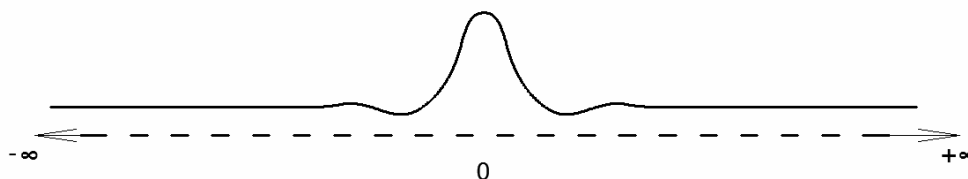


Рис. 2. Локальная форма колебаний

Для определения неизвестной частоты  $\omega^*$  локальной формы  $\tilde{u}$ , используя условие  $u(0) = u_1$ , из (6) получим:

$$\frac{2}{M \sin \pi/4} = \left(\frac{\omega^{*2}}{D}\right) \cdot \left(\frac{k}{D} - m\left(\frac{\omega^{*2}}{D}\right)\right)^{-3/4} . \quad (9)$$

Используя математические преобразования, выражение (9) можно свести к уравнению 4-го порядка относительно  $(\omega^{*2} / D)$ . Так же можно показать, что при любых положительных значениях постоянных, указанное уравнение будет иметь только один действительный корень.

Аналитическое определение параметра  $\omega^*$  из уравнения (9) представляет собой отдельную математическую задачу с весьма громоздкими преобразованиями и конечным выражением. Данная же работа носит более общий характер, в связи с чем, определение  $\omega^*$  выполним далее численными методами с использованием программы Maple.

Для определения деформаций при колебаниях по локальной форме продифференцируем выражение (6), с учетом (7) по  $x$ . В результате получим:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} = \frac{\omega^{*2} M u_1}{2Da} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}}{2} a|x|\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\sqrt{2}}{2} a|x|\right), \quad (10)$$

здесь, как и ранее приведено абсолютное значение.

Для определения максимальных значений деформаций, используя необходимые и достаточные условия существования экстремума функции (10), получим:

$$\tilde{\varepsilon}_{\max}|_{x=0} = \frac{\sqrt{2} \omega^{*2} M u_1}{4 Da}, \quad (11)$$

здесь опущен знак минус. Далее, в качестве начального смещения  $u_1$  будем принимать максимальное смещение грунта  $D_{max}$  вследствие прохождения сейсмической волны, согласно (1). Тогда, для оценки вклада локальной формы колебаний, с учетом (2) после математических преобразований получим соотношение:

$$\frac{\tilde{\varepsilon}_{\max}}{\varepsilon_{\max}} = \frac{\sqrt{2} \omega^{*2} M}{4 Da} \left(\frac{V_s}{\omega}\right)^2. \quad (12)$$

Выражение (12) получено при максимально возможном значении функции  $\sin$  в зависимости (2).

Выполним количественную оценку. Будем рассматривать участок нефтепровода из стальной трубы 1220x12. Плотность продукта примем  $800 \text{ кг/м}^3$ , а физические характеристики следующими:  $k = 2,00 \cdot 10^8 \text{ Па}$  (для песчаных грунтов),  $M = 10,00 \text{ т}$ ,  $\omega = 200,0 \text{ 1/с}$  (для преобладающего периода колебаний грунта  $0,03 \text{ с}$ ),  $V_s = 800 \text{ м/с}$  (для принятого грунта),  $E = 2,00 \cdot 10^{12} \text{ Па}$ . Тогда  $m_0 = 1,273 \text{ т/м}$ ,  $D = 8,43 \cdot 10^9 \text{ Па} \cdot \text{м}^4$ ,  $a = 0,21 \text{ 1/м}$ , частота отсечки  $\omega_b = 396,3 \text{ 1/с}$ , собственная частота –  $\omega^* = 287,1 \text{ 1/с}$ . Вклад локальной формы колебаний, при принятых параметрах, составит:

$$\tilde{\varepsilon}_{\max} / \varepsilon_{\max} = 1,70.$$

Результат количественной оценки показывает значительную роль локальной формы изгибных колебаний, относительно принятого нормативного подхода [4, 5]. Это подтверждается материалами обследований, зафиксировавших повреждения трубопровода в местах примыкания конструктивных включений [1].

Проанализируем полученные результаты. При заданных параметрах трубопровода и внешней нагрузки частота отсечки превышает преобладающую частоту вынуждающего воздействия, и, следовательно, сейсмическое возмущение не приводит к колебаниям сооружения, а трубопровод является «волноводом», воспринимающим сейсмические волны. Это в целом соответствует нормативному подходу [4, 5]. Так, данные натурных наблюдений [11] свидетельствуют о

высокой надежности прямолинейных участков трубопроводов без конструктивных включений даже при сильных землетрясениях.

Далее, при принятых параметрах, частота локальной формы колебаний значительно ниже частоты отсечки, что свидетельствует о возможности ее реализации. Другими словами, при заданных параметрах реальная сейсмическая нагрузка, при наличии в ее спектре соответствующих высших гармоник, может привести к локальным колебаниям конструктивного включения при относительно покоящемся трубопроводе – «волноводе», что никак не регламентируется действующими нормативными документами [4, 5].

### Вывод

При определенных параметрах трубопровода с конструктивным включением и грунтовых условий, сейсмическая нагрузка может привести к возникновению локальных колебаний конструктивного включения трубопровода, при относительно покоящемся трубопроводе. Данная особенность работы конструкций при динамических воздействиях, не регламентируемая действующими нормативными документами, может играть определяющую роль в части обеспечения прочности сооружения.

### Л и т е р а т у р а

1. Гехман А.С., Зайнетдинов Х.Х. Расчет, конструирование трубопроводов в сейсмических районах. – М.: Стройиздат, 1988. – 184 с.
2. Мурзаханов Г. Х., Олейникова А.О. Анализ трубопровода на сейсмическое воздействие // Бурение и нефть. – 2008. – № 11. – С. 20-23.
3. Муравьева Л.В. Расчет подземных трубопроводов, проложенных в сейсмических районах // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. – 2008. – Вып. 10(29). – С. 184-187.
4. СНиП 2.05.06-85\* «Магистральные трубопроводы».
5. СТО Газпром 2-2.1-249-2008 «Магистральные трубопроводы».
6. Локализация линейных волн/ Д.А. Индейцев [и др.]. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2007. – 342 с.
7. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. – М.: Недра, 1991. – 287 с.
8. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. 255 с.
9. Денисов Г.В., Лалин В.В. О сплошном спектре колебаний балочных элементов конструкции при высокочастотных воздействиях // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – №1(27). – С. 91-97.
10. Ерофеев В.И., Кажаяев В.В., Лисенкова Е.Е., Семерикова Н.П. Сравнительный анализ динамического поведения балок моделей Бернулли-Эйлера, Рэлея и Тимошенко, лежащих на упругом основании // Вестник научно-технического развития. – 2009. – № 8 (24). – С. 18-26.
11. Сейсмостойкость магистральных трубопроводов и специальных сооружений нефтяной и газовой промышленности: Сб. АН СССР; Под ред. Савинова О.А. М.: «Наука», 1980. – 170 с.

### PECULIARITIES OF BEHAVIOR OF UNDERGROUND PIPELINES WITH THE STRUCTURAL INCLUSIONS UNDER DYNAMIC ACTIONS

G.V. Denisov, V.V. Lalin

The paper considers the dynamic behavior of an underground pipeline with a structural inclusion. It is shown that the seismic action may lead to local fluctuations of the structural inclusion with respect to a stationary pipeline that could be the determining factor in ensuring the strength of construction.

KEY WORDS: pipeline, the constructive integration, vibration, strength.