

К РАСЧЕТУ УЧАСТКОВ ЗАГЛУБЛЕННЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С КОНСТРУКТИВНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ НА СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Денисов Г.В.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», Санкт-Петербург, Россия (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29), e-mail: denisovgrigoriy@list.ru

В статье приводится методика расчета участков заглубленных магистральных трубопроводов с конструктивными включениями на сейсмическое воздействие. Актуальность рассматриваемого вопроса подтверждается повышенной аварийностью указанных участков, при отсутствии каких-либо специальных указаний по их расчету в действующих нормативных документах. Разработанная ранее методика, по причине необходимости численного решения систем дифференциальных уравнений, не получила широкого распространения на практике. В рамках стержневой схематизации в терминах действующего нормативного подхода получены аналитические выражения для определения дополнительных напряжений, обусловленных локализацией низкочастотных колебаний на указанных участках, и напряжений, обусловленных бегущими волнами (высокочастотными колебаниями). Выполнена количественная оценка напряжений для наиболее часто применяемых на практике труб и типичных грунтовых условий, а также проведено сопоставление с данными других исследователей.

Ключевые слова: трубопровод, сейсмика, конструктивное включение, методика расчета.

ABOUT CALCULATION BURIED PIPELINES WITH CONSTRUCTIVE INCLUSIONS ON SEISMIC ACTION

Denisov G.V.

St. Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg, Russia (195251, St. Petersburg, street Polytechnicheskaya, 29), e-mail: denisovgrigoriy@list.ru

The article provides a method of calculating buried pipelines with structural inclusions on seismic action. Confirmed the relevance of the issue at these high accident areas, in the absence of any specific indication of their calculation in the current regulations. Previously developed technique, because of the need for numerical solutions of systems of differential equations, is not widespread in practice. As part of the rod in terms of the current schematic regulatory approach, analytical expressions for the additional stresses due to the localization of low-frequency oscillations in these areas, and stresses caused by traveling waves (high frequency oscillations). The quantitative evaluation of stress for the most frequently used in practice, pipes and typical soil conditions, as well as a comparison of the data of other researchers.

Keywords: pipeline, seismic action, constructive inclusion, method of calculation.

Результаты многочисленных обследований заглубленных магистральных трубопроводов свидетельствуют, что наиболее аварийными являются участки сооружения, содержащие конструктивные включения, примыкающие к зданиям или другим сооружениям и расположенные в областях с резким изменением свойств грунтов основания [2]. Вместе с тем действующие нормативные документы [9] не регламентируют расчет подобных, особых участков сооружений.

Настоящая статья является продолжением работ [3-5] и посвящена разработке методики расчета участков заглубленных магистральных трубопроводов с конструктивными включениями на сейсмическое воздействие.

Отметим, что ранее уже была разработана методика расчета сложных систем трубопроводов, имеющих сосредоточенные включения [8]. Вместе с тем в виду сложностей, связанных с необходимостью численного решения систем дифференциальных уравнений, указанная методика не получила широкого распространения на практике.

Исследованиями в рамках стержневой схематизации [3-5] было установлено, что обусловленное сейсмовоздействием напряженное состояние участка трубопровода с точечным включением в общем случае формируется:

- напряжениями, обусловленными колебаниями грунта;
- напряжениями, обусловленными низкочастотными локальными колебаниями отдельных участков трубопровода;
- напряжениями, обусловленными бегущими по трубопроводу волнами (высокочастотными колебаниями).

Указанные напряжения накладываются на исходное, основное, напряженное состояние, обусловленное собственными весами трубы и грунта, рабочим давлением и температурными воздействиями.

Напряжения, обусловленные колебаниями грунта

Согласно общепринятому подходу, напряжения, обусловленные колебаниями вмещающего грунтового массива, принято определять в рамках гипотезы «замороженной волны» [2]. При этом трубопровод рассматривается как заземленный в грунте стержень, воспринимающий сейсмическую нагрузку, моделируемую гармоникой с одной преобладающей частотой. Без учета дополнительных коэффициентов указанные напряжения следует определять по зависимости [9]:

$$\sigma = \pm E \frac{a_c T_0}{c_p 2\pi}, \quad (1)$$

где a_c – сейсмическое ускорение, определяемое по данным сейсмического районирования и микрорайонирования; E – модуль упругости материала трубопровода; T_0 – преобладающий период сейсмических колебаний грунтового массива, определяемый при изысканиях; c_p – скорость распространения продольной сейсмической волны в грунтовом массиве, определяемая при изысканиях. Отметим, что аналогичный подход регламентируется и западными нормами [10].

Напряжения, обусловленные локальными колебаниями

После математических преобразований формул, полученных в [4, 5], выражение для определения амплитуды напряжений, обусловленных локальными продольными колебаниями, в терминах действующих норм [9] можно представить в виде:

$$\sigma_{1p} = \pm a_c \left(\frac{T_0}{2\pi} \right)^2 \sqrt{\frac{Em}{A}} \sqrt{\omega_b^2 - \left(\frac{2\pi}{T_0} \right)^2}, \quad (2)$$

где A – площадь поперечного сечения трубы, m – погонная масса, ω_b – частота отсечки ($\omega_b = \sqrt{k/m}$, k – коэффициент продольной жесткости основания), прочие условные обозначения соответствуют ранее принятым обозначениям; выражение для напряжений, обусловленных локальными поперечными колебаниями –

$$\sigma_{1s} = \pm a_c \left(\frac{T_0}{2\pi} \right)^2 \frac{D}{2} \sqrt{\frac{Em}{I}} \sqrt{\omega_{bb}^2 - \left(\frac{2\pi}{T_0} \right)^2}. \quad (3)$$

где D – наружный диаметр трубопровода, I – момент инерции поперечного сечения, ω_{bb} – частота отсечки ($\omega_{bb} = \sqrt{K/m}$, K – коэффициент поперечной жесткости основания), прочие условные обозначения соответствуют ранее принятым обозначениям.

Отметим, что амплитуды колебания, а соответственно и пиковые ускорения грунта a_c в продольном и поперечном направлениях, строго говоря, отличны. То же можно сказать и про преобладающий период колебаний T_0 грунтового основания. Вместе с тем ввиду высокой степени неопределенности реального сейсмического воздействия, указанные величины можно принять равными.

Зависимости (2) и (3) характеризуют дополнительные напряжения, обусловленные локализацией колебаний. Анализируя полученные выражения, можно отметить, что наибольшие напряжения будут соответствовать колебаниям с наименьшей частотой.

Напряжения, обусловленные бегущими волнами

После математических преобразований формул, полученных в [4, 5], выражение для определения амплитуды продольных напряжений, обусловленных бегущими волнами, в терминах действующих нормативных документов, можно представить в виде:

$$\sigma_{2p} = \pm a_c \left(\frac{T_0}{2\pi} \right)^2 \sqrt{\frac{Em}{A}} \sqrt{\omega^2 - \omega_b^2}, \quad (4)$$

здесь ω – частота колебаний (частота бегущих волн), прочие условные обозначения соответствуют ранее принятым обозначениям для (2); выражение для поперечных напряжений –

$$\sigma_{2s} = \pm a_c \left(\frac{T_0}{2\pi} \right)^2 \frac{D}{2} \sqrt{\frac{Em}{I}} \sqrt{\omega^2 - \omega_{bb}^2}, \quad (5)$$

здесь условные обозначения соответствуют ранее принятым обозначениям.

Анализируя полученные выражения, можно отметить, что наибольшие напряжения будут возникать на участках, характеризующихся наименьшей частотой отсечки, т.е. более слабых.

Частота колебаний, строго говоря, может находиться в широком интервале, ограниченном только слева частотой отсечки. В этих условиях частоту бегущих волн можно принять наибольшей, обычно фиксируемой при реальных землетрясениях – 35 Гц [1, 6]. Таким образом, для продольных колебаний можно записать

$$\sigma_{2p} = \pm a_c \left(\frac{T_0}{2\pi} \right)^2 \sqrt{\frac{Em}{A}} \sqrt{(2\pi \cdot 35)^2 - \omega_b^2}, \quad (6)$$

для поперечных –

$$\sigma_{2s} = \pm a_c \left(\frac{T_0}{2\pi} \right)^2 \frac{D}{2} \sqrt{\frac{Em}{I}} \sqrt{(2\pi \cdot 35)^2 - \omega_{bb}^2}. \quad (7)$$

Отметим, что с учетом спектра сейсмических воздействий [1, 6], амплитуду напряжений, обусловленных бегущими волнами, как характеризующихся высокими частотами колебаний, следует принять не менее чем в 2 раза меньше амплитуды напряжений, обусловленных локальными низкочастотными колебаниями. Вместе с тем с учетом эффектов отражения волн амплитуда также может возрасти в 2 раза [3]. Таким образом, суммирование напряжений следует проводить без понижающих коэффициентов, обусловленных частотной составляющей.

Количественная оценка

Выполним количественную оценку. Стальной нефтепровод диаметром $D = 1,22$ м ($m = 1300$ кг/м; $A = 4,55 \cdot 10^{-2}$ м²; $I = 8,31 \cdot 10^{-3}$ м⁴; $E = 2,0 \cdot 10^{11}$ Па) расположен на песчаном основании ($k = 2 \cdot 10^7$ Па; $K = 5 \cdot 10^7$ Па). Принимая преобладающий период колебаний $T_0 = 0,2$ с (31,4 рад/с) (грунты II категории), пиковое ускорение $a_c = 2,0$ м/с² (8 баллов) и скорость распространения сейсмических волн $c_p = 250$ м/с, напряжения, вычисленные в рамках нормативного подхода [9], без учета дополнительных коэффициентов, составляют 51 МПа.

Пусть участок трубопровода содержит конструктивное включение. Напряжения вследствие локальных колебаний, обусловленных наличием неоднородности, составят 18,4 и 42,3 МПа. Таким образом, вследствие локальных колебаний, действующие напряжения более чем в 2 раза превышают напряжения на линейном участке.

В качестве второго примера рассмотрим газопровод тех же параметров и в тех же грунтовых условиях, при этом погонную массу сооружения примем $m = 500$ кг/м, параметры сейсмоздействия: преобладающий период $T_0 = 0,5$ с (12,6 рад/с), пиковое ускорение $a_c = 2,0$ м/с². Напряжения, обусловленные сейсмическими волнами в грунте, вычисленные согласно требованиями [9], составляют 128 МПа. Для участка газопровода с локализатором колебаний дополнительные напряжения составят 119,0 и 268,0 МПа. Таким образом, вследствие локальных колебаний, действующие напряжения более чем в 4 раза превышают напряжения на линейном участке.

Результаты количественных оценок для наиболее часто применяемых труб для магистральных нефте- и газопроводов, расположенных на нескальном грунтовом основании, приведены в таблице.

Количественная оценка напряжений

k К, МПа	Период / частота, с / Гц	Ускор., м/с ²	Труба		Напряжения, МПа		
			D, мм	m, кг/м	СНиП	Локальные колебания	Бегущие волны
<u>10</u> 20	0,3 / 3,3	4,0	1220x12	1300	127,0	<u>58,8</u> 120,0	<u>139,0</u> 179,0
<u>10</u> 20	0,4 / 2,5	4,0	1220x12	500	170,0	<u>107,0</u> 217,0	<u>128,0</u> 99,0
<u>10</u> 20	0,3 / 3,3	4,0	1020x12	1000	127,0	<u>64,8</u> 130,0	<u>130,0</u> 156,0
<u>10</u> 20	0,4 / 2,5	4,0	1020x12	400	170,0	<u>117,0</u> 233,0	<u>114,0</u> -
<u>20</u> 50	0,2 / 5,0	2,0	1220x12	1300	51,0	<u>18,4</u> 42,3	<u>27,8</u> 21,7
<u>20</u> 50	0,5 / 2,0	2,0	1220x12	500	128,0	<u>119,0</u> 268,0	<u>54,2</u> -
<u>20</u> 50	0,2 / 5,0	2,0	1020x12	1000	51,0	<u>20,3</u> 46,6	<u>24,8</u> -
<u>20</u> 50	0,5 / 2,0	2,0	1020x12	400	128,0	<u>130,0</u> 294,0	-

Примечания:

1. Над чертой приведены значения соответствующие продольным колебаниям, под чертой – поперечным.
2. Прочерки в ячейках указывают на невозможность возникновения бегущих волн, вследствие невыполнения частотного условия.
3. Напряжения по СНиП приведены без учета дополнительных коэффициентов.
4. Цветом выделены строки, соответствующие газопроводам.

В качественном отношении результаты хорошо согласуются с данными, полученными в рамках конечно-элементного моделирования заглубленного трубопровода с п-образным участком [7] при сейсмическом воздействии, моделируемом в рамках линейно-спектральной

теории сейсмостойкости. Так, в указанной работе получено, что напряжения, действующие в коленах, более чем в 2 раза превышают напряжения на линейном участке.

Схожие результаты получены и при расчетах в рамках сейсродинамической теории [8]. Так, напряжения в местах примыкания и стыковки трубопроводов превышают напряжения, действующие на отдалении от указанной области, не менее чем в 2 раза.

Заключение

Для обеспечения прочности участков трубопроводов, содержащих конструктивные включения, предлагается использовать методику аналитического расчета, основанную на учете явлений локализации колебаний на указанных участках. Результаты количественных оценок по предлагаемой методике показывают хорошую согласованность с данными других исследователей.

Список литературы

1. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость. СПб.: Наука, 1998. 255 с.
2. Гехман А.С., Зайнетдинов Х.Х. Расчет, проектирование трубопроводов в сейсмических районах. М.: Стройиздат, 1988. 184 с.
3. Денисов Г.В., Лалин В.В. Трансформация волн, распространяющихся по заглубленному трубопроводу, вследствие конструктивных включений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2013. № 2. С.56-62.
4. Денисов Г.В., Лалин В.В. Предложения по расчету участков заглубленных магистральных трубопроводов с конструктивным включением на сейсмическое воздействие // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2013. № 3. С.20-23.
5. Денисов Г.В., Лалин В.В. Собственные колебания заглубленных магистральных трубопроводов при сейсмическом воздействии // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2013. № 4 (38). С. 14-17.
6. Мельников Б.Е., Мочалов М.А. Цейтлин Б.В. Расчет нестационарных колебаний рамных фундаментов// Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений. Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции. СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1985. С.396-398.
7. Мурзаханов Г. Х., Рябцев С.Л. Расчет трубопровода на сейсмическое воздействие методом конечных элементов // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 1. С. 44-48.
8. Рашидов Т. Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. Ташкент: Фан, 1973. 179 с.

9. СП 36.13330.2012 «Магистральные трубопроводы», актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*.
10. Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary on standard for analysis of safety-related nuclear structures // ASCE Standard, 1986.

Рецензенты:

Лалин В.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Строительная механика и строительные конструкции» ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург.

Мельников Б.Е., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Сопротивление материалов» ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург.