

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНОГО ТРУБОПРОВОДА С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ

Исследуется динамическая устойчивость подземных систем жизнеобеспечения, расположенных в водонасыщенных грунтах. Задача решена как аналитически, так и численно на основе метода конечных элементов (МКЭ). Показано хорошее совпадение численных результатов с аналитическими решениями. Проведен анализ, который позволил выявить влияние различных факторов, включая реологические параметры грунта, геометрические и механические характеристики трубопровода на динамическую устойчивость системы.



**РАШИДОВ
ТУРСУНБАЙ РАШИДОВИЧ**

Доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки, академик АН Республики Узбекистан, лауреат Государственной премии им. Абу Райхона Беруни, главный научный сотрудник Института сейсмостойкости сооружений АН РУз (Ташкент, Узбекистан).

Основные направления деятельности:

- строительная механика, теория волн и колебаний, механика деформируемого твердого тела, сейсмостойкость подземных и наземных сооружений, динамика оснований и фундаментов. Автор 17 монографий, более 500 научных статей и авторских свидетельств.



**АН
ЕКАТЕРИНА ВЛАДИМИРОВНА**

Младший научный сотрудник Института сейсмостойкости сооружений АН РУз (Ташкент, Узбекистан).

- механика деформируемого твердого тела, теоретическое исследование устойчивости подземных трубопроводов, расположенных в водонасыщенных грунтах. Автор 35 научных работ.

Введение

Подземные системы жизнеобеспечения используются для водо-, газо-, нефтеснабжения и сброса сточных вод. Основы сейсродинамической теории ортогонально расположенных подземных трубопроводных систем изложены в [1], где разработана схема исследования НДС этих систем в условиях сейсмоопасности.

Условия современного строительства в сейсмических районах осложняются наличием опасных геологических процессов (оползни, обвалы, сели, просадочные грунты, подтопление территорий, высокий уровень грунтовых вод и др.). Проблема оценки устойчивости подземных трубопроводов, взаимодействующих с водонасыщенным грунтом, является актуальной для всех регионов, расположенных в сейсмически опасных районах. В работах [2, 3] установлено, что разжижение вмещающих грунтов является главной причиной "всплытия" трубопровода. В [4] отмечено, что в водонасыщенных грунтах обнаружены случаи выпучивания из-под земли участков трубопровода, которые проявляются при больших деформациях в толще грунтового массива и значительных сжимающих усилиях вдоль продольной оси трубопровода. Это явление наблюдается на подземных трубопроводах всех видов [2, 3, 14]. На рис. 1 показаны характерные повреждения подземных трубопроводов в результате землетрясений.

Проблема устойчивости стержней (трубопроводов) рассматривалась А.С. Вольмиром, Г. Каудерером, Д.В. Капитановым, В.Ф. Овчинниковым, Л.В. Смирновым, В.И. Малым, Uno H., Oka F., Tanizaki S., Tateishi A., Yasuda S., Mayuzumi S., Onose H. и др. [2, 4...7, 9...12, 14].

Постановка задачи

В процессе эксплуатации подземный трубопровод подвергается различным по характеру и величине нагрузкам, приводящим к сложному напряженно-деформированному состоянию и большим поперечным деформациям. Подземный трубопровод моделируется как однородный стержень, шарнирно закреплённый на концах. Разделим трубопровод длиной l на конечные элементы, их размеры полагаем одинаковыми и равными a . Концы элементов, которыми они соединяются между собой, назовем узловыми точками. Перемещения узловых точек примем за обоб-

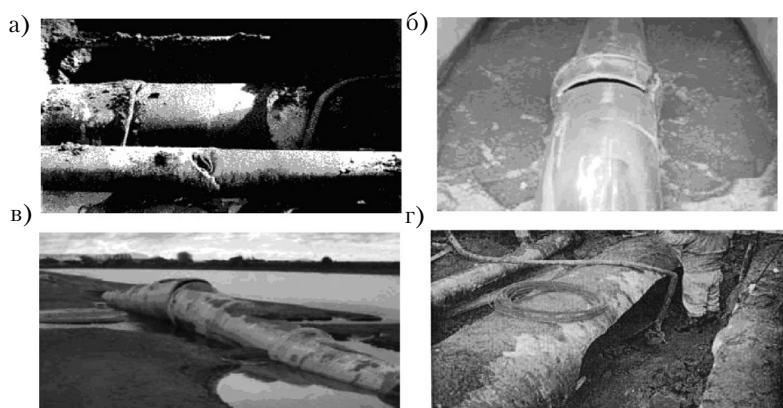


Рис. 1. Типы повреждений трубопроводов:
 а - трещины растяжения/сжатия; б - выпучивание трубопровода; в - разрушение раструбных соединений; г - трещины вдоль тела трубопровода

ценные координаты трубопровода. Полагаем, что в сечении $x = 0$ первого элемента действует сила сжатия P . Согласно [5], такая же сила в каждый момент времени действует во всех сечениях трубопровода.

Составим выражение полной работы деформации для i -ого элемента (учитывая геометрическую нелинейность и используя гипотезу Кирхгофа [5, 6])

$$A_u^i = \frac{EF}{8} \int_0^a \left(\frac{\partial W_1^i}{\partial x} \right)^4 dx + \frac{EJ}{2} \int_0^a \left(\frac{\partial^2 (W_1^i - W_0^i)}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (1)$$

и кинетической энергии трубы

$$E_k^i = \frac{\mu}{2} \int_0^a \left(\frac{\partial W_1^i}{\partial t} \right)^2 dx, \quad (2)$$

где $W_0^i = W_0^i(x)$, $W_1^i = W_1^i(x, t)$ – начальный и полный прогибы i -ого элемента; E – модуль упругости материала трубы; J – осевой момент инерции сечения трубы; F – поперечное сечение трубы; μ – погонная масса.

Потенциал силы сжатия

$$V_p^i = -\frac{P}{2} \int_0^a \left(\frac{\partial W_1^i}{\partial x} \right)^2 dx. \quad (3)$$

Работа сил взаимодействия элемента трубопровода с грунтом

$$A_{D1}^i = \frac{1}{2} \int_0^a K (W_1^i - W_0^i)^2 dx; \quad A_{D2}^i = \frac{1}{2} \int_0^a B \frac{\partial}{\partial t} (W_1^i)^2 dx, \quad (4)$$

где K и B – коэффициенты упругого и вязкого взаимодействия трубопровода с грунтом.

Граничные условия (трубопровод на концах шарнирно закреплен):

$$W_1 = 0, \quad \frac{\partial^2 W_1}{\partial x^2} = 0 \quad \text{при } x = 0; l. \quad (5)$$

Форму трубопровода в поперечном направлении представим через полиномы Эрмита кубической степени $\Theta_1 \dots \Theta_4$. Обозначим через $W_1^{i,i+1}$ прогибы балки в элементе, расположенном между i и $i + 1$ узлами. Учитывая граничные условия (5)

$$W_1^{1,2} = \Theta_3 q_3 + \Theta_4 q_4;$$

$$W_1^{2,3} = \Theta_1 q_3 + \Theta_2 q_4 + \Theta_3 q_5 + \Theta_4 q_6;$$

$$W_1^{3,4} = \Theta_1 q_5 + \Theta_2 q_6 + \Theta_3 q_7 + \Theta_4 q_8;$$

$$W_1^{i,i+1} = \Theta_1 q_{2i-1} + \Theta_2 q_{2i} + \Theta_3 q_{2i+1} + \Theta_4 q_{2i+2}, (i = 2 \dots n-1);$$

$$W_1^{n,n+1} = \Theta_1 q_{2n-1} + \Theta_2 q_{2n},$$

где $\Theta_1 = 1 - \frac{3}{2}\xi^2 + \frac{1}{2}\xi^3$, $\Theta_2 = a(\xi - \frac{3}{2}\xi^2 + \frac{1}{2}\xi^3)$, $\Theta_3 = \frac{3}{2}\xi - \frac{1}{2}\xi^3$, $\Theta_4 = a\left(-\frac{\xi}{2} + \frac{\xi^3}{2}\right)$; $\xi = \frac{x}{a}$; $q_3, q_5, q_7 \dots q_{2i-1n}$ –

прогибы; $q_4, q_6, q_8 \dots q_{2n-1}$ – углы поворота в узлах элементов [7].

Общая потенциальная Π и кинетическая E_k энергии

$$\Pi = \sum_{i=1}^n A_u^i + \sum_{i=1}^n V_p^i, \quad E_k = \sum_{i=1}^n E_k^i.$$

Определим функцию Лагранжа $L = E_k - \Pi$, $q_i = q_i(t)$ – обобщенные координаты.

Например, для трубопровода, разделенного на два элемента ($n=2$) с тремя узлами $W_1^{1,2} = \Theta_3 q_3 + \Theta_4 q_4$, $W_1^{2,3} = \Theta_1 q_3 + \Theta_2 q_4$,

С использованием (1)...(4) после несложных вычислений и подстановки результатов в уравнение Лагранжа – II рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\bar{q}}_3} \right) - \frac{\partial L}{\partial \bar{q}_3} = -\frac{\partial A_{D1}}{\partial \bar{q}_3} - \frac{\partial A_{D2}}{\partial \bar{q}_3}, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_4} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_4} = -\frac{\partial A_{D1}}{\partial q_4} - \frac{\partial A_{D2}}{\partial q_4},$$

где $L = E_k - A_u - V_p$, $\bar{q}_3 = q_3/a$,
получим

$$\begin{cases} 0,9714\mu a \ddot{\bar{q}}_3 + \frac{EF}{a^3} [1,44\bar{q}_3^3 + 0,32\bar{q}_3 q_4^2] + \frac{6EJ}{a^3} (\bar{q}_3 - \bar{q}_3^0) - 2,4\frac{P}{a} \bar{q}_3 = \\ = -Ka \left(0,9714 \bar{q}_3 - \frac{96}{\pi^4} \bar{q}_3^0 \right) - 0,9714Ba \dot{\bar{q}}_3; \\ 0,038\mu a \ddot{q}_4 + \frac{EF}{a^3} [0,32\bar{q}_3^2 q_4 + 0,04q_4^3] + \frac{6EJ}{a^3} q_4 - 0,4\frac{P}{a} q_4 = \\ = -0,038Ka q_4 - 0,038Ba \dot{q}_4, \end{cases}$$

Сведем эти уравнения к системе уравнений в безразмерных переменных первого порядка, $t_1 = t/T_0$, где t_1 и T_0 – безразмерное и характерное время.

$$\begin{cases} \frac{d\bar{q}_3}{dt_1} = y; \\ \frac{dy}{dt_1} = \frac{-EFT_0^2}{0,9714\mu a^4} [1,44\bar{q}_3^3 + 0,32\bar{q}_3 q_4^2] - \frac{6EJT_0^2}{0,9714\mu a^4} (\bar{q}_3 - \bar{q}_3^0) + \frac{2,4PT_0^2}{0,9714\mu a^2} \bar{q}_3 - \\ - \frac{KT_0^2}{0,9714\mu} \left(0,9714\bar{q}_3 - \frac{96}{\pi^4} \bar{q}_3^0 \right) - \frac{BT_0}{\mu} y; \\ \frac{dq_4}{dt_1} = z; \\ \frac{dz}{dt_1} = \frac{-EFT_0^2}{0,038\mu a^4} [0,32\bar{q}_3^2 q_4 + 0,04q_4^3] - \frac{6EJT_0^2}{0,038\mu a^4} q_4 + \frac{0,4PT_0^2}{0,038\mu a^4} q_4 - \frac{KT_0^2}{\mu} q_4 - \frac{BT_0}{\mu} z, \end{cases}$$

Результаты и их анализ

Полученная система дифференциальных уравнений решается методом Рунге-Кутты. На рис. 1 и 2 представлены кривые зависимостей максимальных амплитуд поперечных движений подземного трубопровода от безразмерного времени $t_1 = t/T_0$ при действии на подземный трубопровод

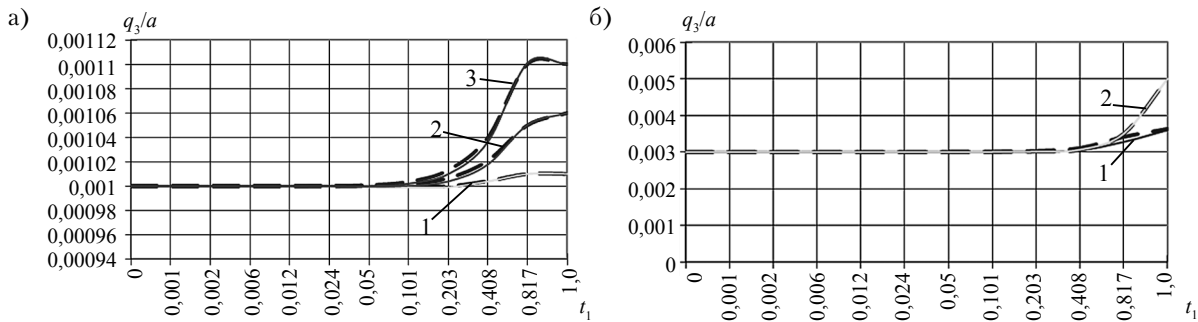


Рис. 2. Зависимость максимальной амплитуды поперечных движений трубопровода в зависимости от t_1 : — аналитическое; - - - МКЭ; а - $c = 10^3$ (1); $c = 5 \cdot 10^3$ (2); $c = 10^4$ (3); б - $T_0 = 0,35$ (1); $T_0 = 0,4$ (2)

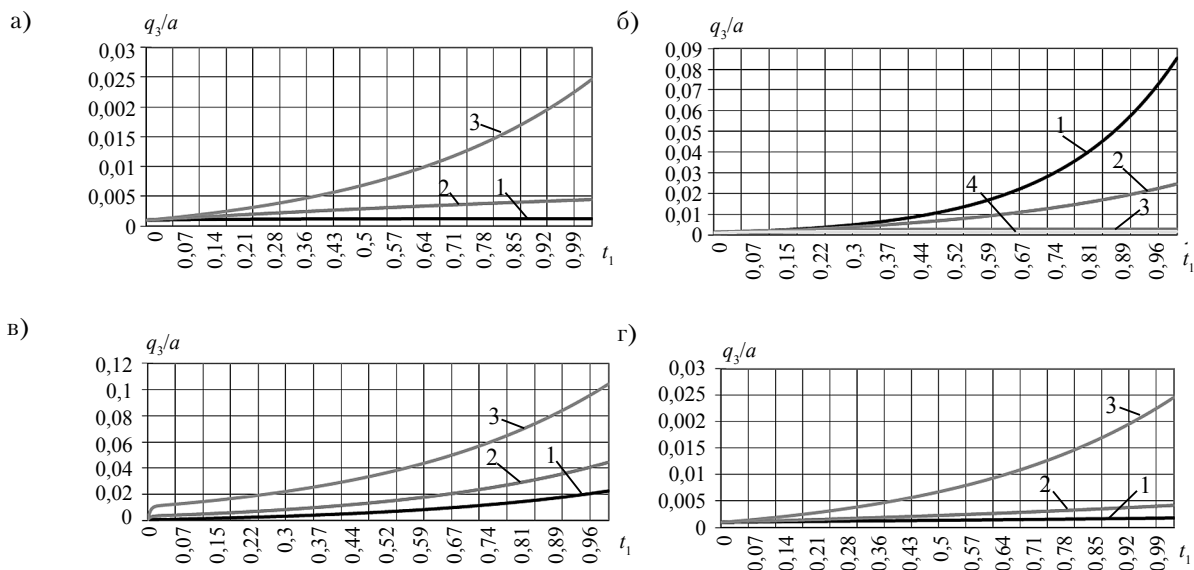


Рис. 3. Зависимости поперечных движений подземного трубопровода от времени при: а - $P = 0,1F_{кр}$ (1); $P = 0,5F_{кр}$ (2); $P = 0,8F_{кр}$ (3); б - $K = 0,5$ (1); 1 (2); 3 (3); 5 (4); в - $\mu = 0,05$ (1); 0,5 (2); 2 (3); г - $\mu = 1$ (1); 10 (2); 100 (3)

осевой силы $P(t) = cFt$ и $P = mF_{кр}$, где c – скорость изменения сжимающего напряжения; m – коэффициент; $F_{кр} = 4\pi^2 EJ/l^2$ – эйлерова критическая сила. Если считать, что трубопровод является балкой на упругом основании, то полагая $K = k_1 b$, где b – ширина балки, k_1 можно рассматривать как коэффициент податливости основания или коэффициент постели [1]. Принимаем, что трубопровод совершает поперечные движения в водонасыщенном грунте (который предположительно обладает свойствами вязкой жидкости) с частотой ω , тогда коэффициент $B = \alpha'(2\sqrt{2}\sqrt{\rho_2 \mu \omega F})/R$ [8], где α' – поправочный коэффициент; ρ_2 – плотность грунта; μ – динамический коэффициент вязкости. Расчеты проводились для различных значений c , T_0 , K , B , геометрических характеристик трубопровода. Отметим, что аналитические исследования динамической устойчивости подземного трубопровода выполнены в [9], где результаты решения представлены в виде расчетных формул, пригодных для их практического применения.

По результатам численных и аналитических решений построены графики изменения максимальной амплитуды поперечных движений трубопровода в зависимости от безразмерного и характерного времени T_0 (см. рис. 2).

Сравнение результатов, полученных численным методом (МКЭ) и аналитическим расчетом по [9] (см. рис. 2) показывает, что результаты достаточно близки, погрешность незначительна. Чтобы выявить влияние других параметров на величину прогиба трубы, были выполнены численные расчеты зависимостей q_3/a от времени для различных P , K , μ и γ (рис. 3).

Из анализа полученных кривых следует, что чем больше продольная сила, тем прогиб трубопровода больше. Коэффициент упругого взаимодействия трубопровода с грунтом K значительно влияет на устойчивость трубопровода, чем он больше, тем трубопровод более устойчивый. Вы-

явлено, что чем больше скорость воздействия, тем быстрее трубопровод оказывается в состоянии динамической неустойчивости при действии продольной нагрузки. Чем больше коэффициент вязкого взаимодействия трубопровода с грунтом B , тем он менее устойчивый. Чем больше начальный прогиб, тем больше выпучивание трубопровода.

Выбирая различные геометрические характеристики трубопровода, грунтовые условия (определяемые через коэффициенты взаимодействия) и действующую нагрузку, можно провести анализ полученных решений.

В настоящее время накопилось достаточно данных, связанных с устойчивостью подземных систем жизнеобеспечения, расположенных в грунтах с разными свойствами, в частности, японских ученых [10], которые проводили лабораторные эксперименты на центрифуге, изучая подъем подземных трубопроводов. Полученные авторами настоящей статьи результаты согласуются с некоторыми выводами [10]: "В динамических экспериментах на центрифуге, скорость подъема модели подземного сооружения зависит от начальной амплитуды и частоты начального ускорения; скорость подъема зависит от жесткости и коэффициента затухания; разжижение грунта и остаточные деформации, часто приводят к значительному ущербу".

Выводы

Исследование устойчивости подземного трубопровода, расположенного в водонасыщенном грунте, является одной из сложных задач механики деформируемого твердого тела. В работе приведены сравнения результатов аналитического и численного решений.

Достоверность полученных результатов обоснована конкретными примерами, в которых показано хорошее совпадение численных результатов (МКЭ) с аналитическими решениями. Полученные результаты хорошо согласуются с отечественными и зарубежными экспериментальными исследованиями воздействия землетрясений на подземные трубопроводы [2, 3, 10, 13, 14] и способствуют дальнейшему развитию сейсמודинамической теории подземных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рашидов Т.Р. Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. - Ташкент: Фан, 1973. - 180 с.
2. Yasuda S., Mayuzumi S., Onose H. Appropriate countermeasures against liquefaction-induced uplift of existing manholes and pipes // Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering. Japan. - 2009. - Pp. 1127-1132.
3. Lanzano G., Santucci de Magistris F., Fabbrocino G., Salzano E. Multidisciplinary approach for the seismic vulnerability evaluation of lifelines and structural components of industrial plants // 15th World Conference on earthquake engineering. Lisbon. - 2012.
4. Friedmann I. Debouvry B. Analytical design method helps prevent buried pipe upheaval // Pipe Line Industry. - 1992, IX. - Vol. 76. - № 11. - Pp. 63 - 69.
5. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. - М.: Наука, 1967. - 984 с.
6. Каудерер Г. Нелинейная механика. - М.: ИЛ, 1961. - 778 с.
7. Сборник задач по сопротивлению материалов / под ред. А.С.Вольмира. М.: Наука, 1984. - 408с.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. - М.: Наука, 1988. - 736 с.
9. Ан Е.В., Рашидов Т.Р. Сейсמודинамика подземных трубопроводов, взаимодействующих с водонасыщенным мелкодисперсным грунтом // Механика твердого тела. - 2015. - № 3. - С. 89-104.
10. Uno H., Oka F., Tanizaki S., Tateishi A. Centrifuge model tests on the uplift behavior of an underground structure during liquefaction and its numerical modeling // Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering. Japan. - 2009. - Pp. 1127-1132.
11. Малый В.И. Качественный анализ процесса выпучивания стержня при продольном ударе // Матер. межд. науч. симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 95-летию со дня рождения А.А.Ильюшина. - М., 2006. - С. 351-358.
12. Капитанов Д.В., Овчинников В.Ф., Смирнов Л.В. Динамика упругого продольно нагруженного стержня при потере устойчивости // Проблемы прочности и пластичности. - 2014. - Вып. 76(3). - С. 205 - 2016.
13. Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года. Издательство "Фан" Уз ССР. Ташкент. - 1971. - 672 с.
14. Yasuko Kuwata, Daisuke Ikejiri. Liquefaction hot-spot based on pipeline damage and topographical history in the Kashima region during the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake. 15th World Conference on earthquake engineering. Lisbon. - 2012.