

УДК 539.3

КОЛЕБАНИЯ СИСТЕМ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И КОЛОДЦЕВ, ПРИ ДЕЙСТВИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

^{1,2}Хусаинова Б.Б., ^{3,4}Хусаинов С.Б., ^{1,5*}Хусаинов Р.Б.

*r.khusainov89@yandex.com

¹Университет геологических наук,

100164, Узбекистан, Ташкент, ул. Олимлар, 64;

²Ташкентский филиал Российского экономического университета им. Г.В.Плеханова,

100125, Узбекистан, Ташкент, м-в Ялангач, ул. Шахрибад 3;

³Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,

105005, Россия, Москва, ул. Бауманская 2-я, д. 5;

⁴Ташкентский государственный транспортный университет,

100167, Узбекистан, Ташкент, Темирйулчилар, 1;

⁵Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т.Уразбаева АН РУз,

100125, Узбекистан, Ташкент, Ул. Дурмон Йули, 33.

В работе рассмотрена задача о воздействии продольной волны на систему, состоящую из последовательно расположенных колодцев и трубопроводов конечной длины, и взаимодействующую с грунтом по упруго-вязкому закону. Торцы трубопровода закреплены к массивным колодцам, имеющим объем и массу. Наибольший размер колодца значительно меньше, чем длина трубопровода, поэтому можно пренебречь деформацией колодца, т.е. колодец можно считать абсолютно твердым телом. В задаче для каждого участка трубопровода, ограниченного колодцами, характеристики грунта и трубопровода разные. Задача решена численно, используя явную схему метода конечных разностей. Продольная волна в грунте принимается в виде бегущей волны синуса. В работе приведен сравнительный анализ результатов при некоторых значениях коэффициентов упругого и вязкого взаимодействия и скорости распространения волны. Результаты исследования показали, что размеры колодца имеют значительное влияние на напряженное состояние трубопровода.

Ключевые слова: труба, грунт, взаимодействие, изгиб, колебание, упругость, деформация.

Цитирование: Хусаинова Б.Б., Хусаинов С.Б., Хусаинов Р.Б. Колебания систем, состоящих из подземных трубопроводов и колодцев, при действии сейсмической волны // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2024. – № 3(57). – С. 77-90.

1 Введение

Подземные трубопроводы являются ключевым компонентом важнейших систем жизнеобеспечения, таких как водоснабжение, газ и жидкое топливо, канализация, электроснабжение, телекоммуникации. Взаимодействие со структурой почвы, вызванное сейсмическими волнами, оказывает важное влияние на поведение трубопровода, а при интеграции по всей сети трубопроводов - на производительность системы [1, 2].

В последние десятилетия воздействию распространения волн на подземные сегментированные трубопроводы уделялось большое внимание. В работах [2–6] предложены различные модели для анализа взаимодействия сегментированных трубопроводов при распространении волн.

Повреждения подземных трубопроводов во время землетрясения связаны с совокупностью разных видов опасностей: постоянные деформации грунта (оползни, сжижение и сейсмическая осадка) и эффекты распространения волн. Последние характеризуются переходной деформацией и кривизной в грунте из-за эффекта бегущей волны.

Для анализа распространения волн, Т.Р.Рашидов и Н.М.Ньюмарк [7, 8] предложили простую процедуру с учетом одной бегущей волны с незатухающей (бегущей) волновой формой. По определению Т.Р.Рашидова статическая теория в первом рассмотрен в работе Р.М.Мукурдумова [9], а также приведен в монографиях Ш.Г.Напетваридзе [10] где предложен, что при распространения волны вдоль трубы, труба и грунт движется одинаково.

Аналогичное допущение позже предложено Н.М.Ньюмарком, что подземный трубопровод строго следует за движением почвы, что называется статической теорией. Следовательно, максимальная осевая деформация трубы такая же, как максимальная осевая деформация грунта.

Тем не менее, вышеупомянутые процедуры рассматривают бесконечные длины трубопроводов и, следовательно, не учитывают их эффективную длину и любые строительные работы (условия ограничения). В [11] разработали аналитические соотношения для трубы конечной длины, подвергнутой различным сочетаниям граничных условий (то есть свободный конец, закрепленный или упругий) для трубопроводов различной длины.

В 1962 году Т.Р.Рашидовым предложено дифференциальное уравнение подземного трубопровода, которое стало основой динамической теории. Т.Р.Рашидов [7, 11], Г.Де Мартино и др. [12] и В.Коррадо и др. [13] разработали модели взаимодействия трубы и грунта с учетом ограниченности длины трубопровода. Предполагая линейную упругую модель движения почвы и пренебрегая проскальзыванием на границе контакта трубы и грунта, модель анализирует динамическое поведение трубопровода конечной длины с учетом граничных условий на концах. Предполагалось, что трубопровод будет непрерывным; то есть любые колебания между характеристиками (параметрами) трубопровода и его соединениями считаются незначительными. А.А.Ильюшиным и Т.Р.Рашидовым [2] предложена вязко-упругопластическая модель взаимодействия подземного сооружения с грунтом.

В работах [14–16] проанализировано использование различных механических математических моделей и решен ряд актуальных задач подземных и наземных сооружений.

Модель линейной деформации стержня и линейной зависимости между контактной силой и перемещением сечений трубы использована при решении задач сейсродинамики подземных трубопроводов [17–21]. Однако, анализ результатов опытных данных [2, 22] указывает на более сложную зависимость контактной силы взаимодействия от перемещения сечения трубы относительно грунта.

В работе [22, 23] приведены различные модели взаимодействия подземных сооружений с грунтом, учитывающие упругие, вязкие и пластические свойства грунтов с переходом на трение Кулона.

В работах [18–21, 24] подробно изучено влияние коэффициентов упругости, вязкости и пластичности взаимодействия трубопровода на контакте с грунтом на напряженно деформированного состояние подземного трубопровода. В работе [21] подробно изучена влияние сил инерции на деформированного состояние подземного трубопровода.

В работах [25] исследованы поведения подземных сооружений и грунтов, взаимодействующих по закону Кулона и нелинейной упругопластической модели взаимодействия [25–27].

2 Постановка задачи

Рассмотрим задачу о воздействии продольной волны на систему, состоящую из последовательно расположенных колодцев и трубопроводов конечной длины, взаимодействующую с грунтом по упруго-вязкому закону. Торцы трубопровода закреплены к массивным колодцам, имеющим объем и массу. Сначала рассмотрим случай, когда три колодца и трубопровод расположены в виде, показанном на рисунке 1. Считаем, что для каждого участка трубопровода, ограниченного колодцами, характеристики грунта и трубопровода разные.

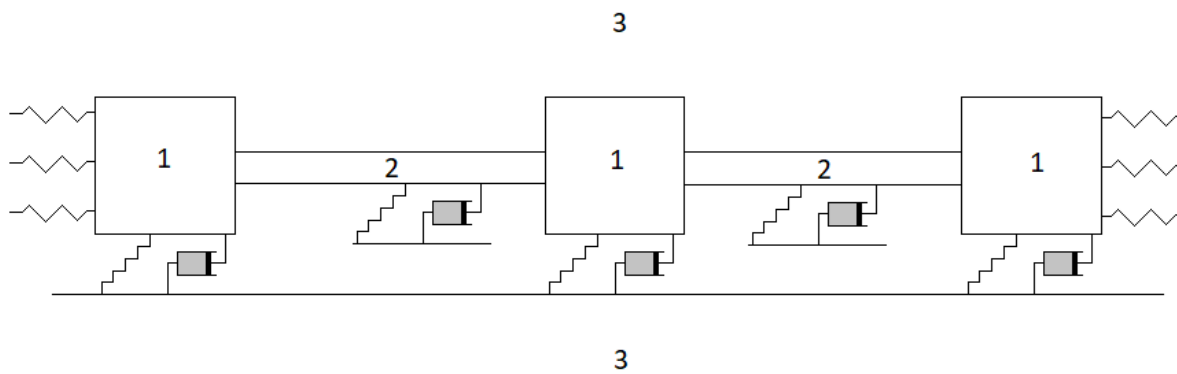


Рис. 1 Схема обтекания продольной волной трубопровода конечной длины, сопряженного с массивными узлами

Для упрощения постановки задачи принимаем следующее: наличие трубопровода не влияет на волновое поле вблизи него.

Поскольку волновое поле за фронтом поверхностной волны зависит от глубины грунтовой среды, рассмотрим осредненные смещения частиц грунтовой среды вдоль оси трубопровода.

Внешняя поверхность трубопровода контактирует с грунтом вдоль оси трубопровода по упруго-вязкому закону, а торцы трубопровода сопряжены с массивными узлами через упругие элементы. С учетом этих предположений уравнение продольных колебаний трубопровода и граничные условия записываются в следующем виде:

$$\rho F_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E F_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \pi D_1 k_1 (u - u_g) + \frac{\pi D_1 \mu_1}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right) = 0, \quad 0 < x < l_1; \quad (1)$$

$$\rho F_2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - E F_2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \pi D_2 k_2 (u - u_g) + \frac{\pi D_2 \mu_2}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right) = 0, \quad l_1 < x < l_2; \quad (2)$$

$$m_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E F_1 \frac{\partial u}{\partial x} - E_g F_g \frac{\partial u_g}{\partial x} - F_h k_3 (u - u_g) - \frac{F_h \mu_3}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right), \quad x = 0; \quad (3)$$

$$m_2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -E F_1 \frac{\partial u^-}{\partial x} + E F_2 \frac{\partial u^+}{\partial x} - E_g F_g \frac{\partial u_g^-}{\partial x} + E_g F_g \frac{\partial u_g^+}{\partial x} - F_h k_4 (u - u_g) - \frac{F_h \mu_4}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right), \quad x = l_1; \quad (4)$$

$$m_3 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -EF_2 \frac{\partial u}{\partial x} + E_g F_g \frac{\partial u_g}{\partial x} - F_h k_5 (u - u_g) - \frac{F_h \mu_5}{H} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \right), \quad x = l_1 + l_2, \quad (5)$$

где $u(x, t)$ – продольное перемещение произвольного сечения трубопровода; $u_g(x, t) = A \cdot \sin \omega (t - x/C_p) H(t - x/C_p)$ – перемещение частиц грунта за фронтом волны, распространяющейся со скоростью C_p ; – максимальное смещение грунта; ω – угловая скорость колебаний сейсмической волны, определяемая по формуле $\omega = 2\pi/\tau$; C_p – «кажущаяся скорость» распространения волны (далее – скорость распространения волны в грунте). «Кажущаяся скорость» распространения волны в грунте может быть большей за счёт угла падения волны к оси трубопровода или за счёт деформативности стыков трубопровода, $H(z)$ – функция Хевисайда; E и ρ – модуль Юнга и плотность материала трубопровода; E_g – модуль Юнга грунта, F_g – площадь поперечного сечения массивных узлов в форме параллелепипеда перпендикулярного к оси трубопровода, F_h – площадь поперечного сечения массивных узлов в форме параллелепипеда параллельного к поверхности земли, m_1 , m_2 и m_3 – массы узлов. k_1 и k_2 – коэффициенты упругого сопротивления системы «труба-грунт» соответственно первого и второго участков системы трубопроводов; k_3 , k_4 и k_5 – коэффициенты упругого сопротивления системы «колодец-грунт» соответственно первого, второго и третьего колодцев (узлов); μ_1 и μ_2 – коэффициенты вязкого взаимодействия системы «труба-грунт» соответственно первого и второго участков системы трубопроводов; μ_3 , μ_4 и μ_5 – коэффициенты вязкого взаимодействия системы «колодец-грунт» соответственно первого, второго и третьего колодцев (узлов);

Начальные условия нулевые, т.е.

$$u = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad \text{при} \quad t = 0. \quad (6)$$

3 Метод решения

Для решения уравнений (1) и (2) используем следующую неявную схему метода конечных разностей второго порядка точности [28]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \bar{t}^2} \approx \frac{\bar{u}_i^{j+1} - 2\bar{u}_i^j + \bar{u}_i^{j-1}}{\tau^2}; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial \bar{x}^2} \approx \frac{\bar{u}_{i+1}^{j+1} - 2\bar{u}_i^{j+1} + \bar{u}_{i-1}^{j+1}}{h^2}, \quad (7)$$

где τ и h – шаг по времени и шаг по координате.

Частные производные по времени и по координате, и перемещению аппроксимируются в следующем виде:

$$\frac{\partial u}{\partial \bar{t}} \approx \frac{u_i^{j+1} - u_i^{j-1}}{2 \cdot \tau}; \quad \frac{\partial u}{\partial \bar{x}} \approx \frac{u_{i+1}^j - u_{i-1}^j}{2 \cdot h}. \quad (8)$$

Перемещения аппроксимируются в следующем виде:

$$u \approx \frac{u_i^{j+1} + u_i^{j-1}}{2}. \quad (9)$$

Аппроксимации дифференциалов функции по времени и по координате (7), (8) и (9) дифференциальных уравнений (1–2) примут следующий вид:

$$u_i^{j+1} = (-c_2 \cdot u_i^{j-1} - c_3 \cdot u_i^j + c_4 \cdot (u_{i-1}^j + u_{i+1}^j) + c_5 \cdot (u_{gi}^{j+1} + u_{gi}^{j-1}) + c_6 \cdot (u_{gi}^{j+1} - u_{gi}^{j-1}))/c_1. \quad (10)$$

Здесь

$$c_1 = \frac{\rho F_i}{\tau^2} + \frac{\pi D_i \mu_i}{2\tau H} + \frac{\pi D_i k_i}{2}; c_2 = \frac{\rho F_i}{\tau^2} - \frac{\pi D_i \mu_i}{2\tau H} + \frac{\pi D_i k_i}{2};$$

$$c_3 = 2 \left(\frac{E F_i}{h^2} - \frac{\rho F_i}{\tau^2} \right); c_4 = \frac{E F_i}{h^2}; c_5 = \frac{\pi D_i k_i}{2}; c_6 = \frac{\pi D_i \mu_i}{2\tau H}.$$

Для аппроксимации частного производного от перемещения по координате на границах используем метод (способ) «фиктивной точки». Остановимся на записи разностной схемы в нерегулярных узлах (на границе или вблизи нее). В этих узлах для записи разностных уравнений необходимо привлекать краевые условия [28].

Рассмотрим способ написания разностного краевого условия с точностью $O(h^2)$. Уравнения (1) и (2) аппроксимируем, используя явную схему.

Используем способ фиктивных точек. Данный способ очень нагляден. Введём вне отрезка $0 < x < l_1$ фиктивную точку $x_{-1} = x_0 - h$ и будем считать исходное уравнение справедливым при $i = 0$. Тогда разностное уравнение (1) можно написать при $i = 0$:

$$\frac{\rho F_1}{\tau^2} (u_0^{j+1} - 2u_0^j + u_0^{j-1}) - \frac{E F_1}{h^2} (u_1^j - 2u_0^j + u_{-1}^j) +$$

$$+ \frac{\pi D_1 k_1}{2} (u_0^{j+1} + u_0^{j-1}) + \frac{\pi D_1 \mu_1}{2\tau H} (u_0^{j+1} - u_0^{j-1}) = G_0^j H(\tau j),$$

где $G_0^j = \pi D_1 k_1 A \sin(\omega \tau \cdot j) + \pi D_1 \mu_1 A \omega \cos(\omega \tau \cdot j) / H$.

Заменим в левом краевом условии (3) производную симметричной разностью:

$$m_1 \frac{1}{\tau^2} (u_0^{j+1} - 2u_0^j + u_0^{j-1}) = E F_1 \frac{1}{2h} (u_1^j - u_{-1}^j) - F_h k_3 \left(\frac{u_0^{j+1} + u_0^{j-1}}{2} \right) -$$

$$- \frac{F_h \mu_3}{H} \left(\frac{u_0^{j+1} - u_0^{j-1}}{2\tau} \right) + W_0^j, \quad i = 0,$$

где $W_0^j = -E_g F_g A \omega \cos(\omega \tau j) / C_p + F_h k_3 A \sin(\omega \tau j) + F_h \mu_3 A \omega \cos(\omega \tau j) / H$.

Исключая из последних двух уравнений фиктивную точку, получим разностный аналог краевого условия:

$$\left(\frac{\rho F_1}{\tau^2} + \frac{2m_1}{h\tau^2} \right) (u_0^{j+1} - 2u_0^j + u_0^{j-1}) -$$

$$- \frac{2E F_1}{h^2} (u_1^j - u_0^j) + \left(\frac{F_h k_3}{h} + \frac{\pi D_1 k_1}{2} \right) (u_0^{j+1} + u_0^{j-1}) +$$

$$+ \left(\frac{F_h \mu_3}{h\tau H} + \frac{\pi D_1 \mu_1}{2\tau H} \right) (u_0^{j+1} - u_0^{j-1}) = \left(G_0^j - \frac{2}{h} W_0^j \right) \cdot H(\tau j),$$

Раскрывая скобки и собирая коэффициенты с одинаковыми переменными, получаем:

$$u_0^{j+1} = \left(-B_1 u_0^{j-1} + C_1 u_0^j + D_1 (u_1^j - u_0^j) + \left(G_0^j - \frac{2}{h} W_0^j \right) \cdot H(\tau j) \right) / A_1,$$

где

$$u_0^{j+1} = \left(-B_1 u_0^{j-1} + C_1 u_0^j + D_1 (u_1^j - u_0^j) + \left(G_0^j - \frac{2}{h} W_0^j \right) \cdot H(\tau j) \right) / A_1;$$

$$B_1 = \frac{\rho F_1}{\tau^2} + \frac{2m_1}{h\tau^2} + \frac{F_h k_3}{h} + \frac{\pi D_1 k_1}{2} - \frac{F_h \mu_3}{h\tau H} - \frac{\pi D_1 \mu_1}{2\tau H}; C_1 = 2 \left(\frac{\rho F_1}{\tau^2} + \frac{2m_1}{h\tau^2} \right); D_1 = \frac{2E F_1}{h^2}.$$

Затем, это уравнение содержит только одно значение с нового слоя u_0^{j+1} , т.е. оно явное.

Точно также определяем u_N^{j+1} для узла, соединяющего первый и второй трубопроводы, и u_k^{j+1} для правой границы участка второго трубопровода длиной l_2 .

Введём вне отрезка $0 < x < l_2$ фиктивную точку $x_{k+1} = x_k + h$ и будем считать исходное уравнение справедливым при $x_{k+1} \geq x$.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho F_2}{\tau^2} + \frac{2m_3}{h\tau^2} \right) (u_k^{j+1} - 2u_k^j + u_k^{j-1}) - \frac{EF_2}{h^2} (u_{k-1}^j - 2u_k^j) - \frac{EF_2}{h^2} u_{k-1}^j + \\ & + \left(\frac{F_h k_5}{h} + \frac{\pi D_2 k_2}{2} \right) (u_k^{j+1} + u_k^{j-1}) + \left(\frac{F_h \mu_5}{h\tau H} + \frac{\pi D_2 \mu_2}{2\tau H} \right) (u_k^{j+1} - u_k^{j-1}) = \\ & = \left(G_k^j + \frac{2}{h} W_k^j \right) \cdot H \left(\tau j - \frac{hk}{C_p} \right), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} G_k^j &= \pi D_2 k_2 A \sin(\omega(\tau \cdot j - hk/C_p)) + (\pi D_2 \mu_2 / H) \cdot A \omega \cos(\omega(\tau \cdot j - hk/C_p)), \\ W_k^j &= -E_g F_g \frac{A \omega}{C_p} \cos(\omega(\tau j - hk/C_p)) + F_h k_5 A \sin(\omega(\tau j - hk/C_p)) + \\ & + \frac{F_h \mu_5}{H} A \omega \cos(\omega(\tau j - hk/C_p)). \end{aligned}$$

Раскрывая скобки и собирая коэффициенты с одинаковыми переменными, получаем:

$$u_k^{j+1} = \left(-B_3 u_k^{j-1} + C_3 u_k^j + D_3 (u_{k-1}^j - u_k^j) + \left(G_k^j - \frac{2}{h} W_k^j \right) \cdot H \left(\tau j - \frac{hk}{C_p} \right) \right) / A_3,$$

где

$$\begin{aligned} A_3 &= \frac{\rho F_2}{\tau^2} + \frac{2m_3}{h\tau^2} + \frac{F_h k_5}{h} + \frac{\pi D_2 k_2}{2} + \frac{F_h \mu_5}{h\tau H} + \frac{\pi D_2 \mu_2}{2\tau H}; \\ B_3 &= \frac{\rho F_2}{\tau^2} + \frac{2m_3}{h\tau^2} + \frac{F_h k_5}{h} + \frac{\pi D_2 k_2}{2} - \frac{F_h \mu_5}{h\tau H} - \frac{\pi D_2 \mu_2}{2\tau H}; C_3 = 2 \left(\frac{\rho F_2}{\tau^2} + \frac{2m_3}{h\tau^2} \right); D_3 = \frac{2EF_2}{h^2}. \end{aligned}$$

4 Результаты и обсуждение

Напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода в виде системы из подземных труб и узлов, имеющей форму параллелепипеда и массу, весьма сложный процесс. Состояние подземного трубопровода зависит не только от параметров трубы и грунта, но и от параметров узла. Мы знаем, что вес узла значительно больше погонного веса трубопровода. Многими учеными изучены отдельные (свободные) колебания узла как материальной точки на шероховатой поверхности, при этом не учитывается действие трубопровода на узел. Мы сначала рассмотрим задачу, в которой перемещения системы «труба-грунт» не выходят за пределы упругости.

Рассмотрим случай, когда длина волны в грунте, т.е. сейсмическая волна принимается в виде гармонической функции синуса, больше длины участков первого и второго трубопроводов.

Характеристики трубы, колодца и грунта принимаем следующими: плотность, $\rho = 7800$ кг/м³, модуль Юнга, $E = 2.1108$ кН/м², длина $l_1 = 30$ м и $l_2 = 50$ м, диаметр $D_1 = D_2 = 0.2$ м, толщина $s = 0.005$ м, коэффициент упругого взаимодействия

системы «труба-грунт» $k_1 = k_2 = 10^4$ кН/м³, коэффициент вязкого взаимодействия системы «труба-грунт» $\mu_1 = \mu_2 = 100$ кН·с/м², скорость распространения волны $P = 1000$ м/с, период основных колебаний s , амплитуда колебаний $A = 4$ мм, модуль Юнга грунта, $E_g = 4 \cdot 10^4$ кН/м², глубина заложения $H = 1$ м, масса первого колодца $m_1 = 100$ кг, масса второго колодца $m_2 = 1000$ кг, масса третьего колодца $m_3 = 100$, кг, размеры колодца: высота 1 м, длина 1 м, ширина 1 м, коэффициент упругого взаимодействия системы «колодец-грунт» $k_3 = k_4 = k_5 = 4 \cdot 10^4$ кН/м³, коэффициент вязкого взаимодействия системы «колодец-грунт» $\mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = 100$, кНс/м²,

Для анализа поведения рассмотрена система, состоящая из последовательно закрепленных трех колодцев и двух участков подземного трубопровода длиной 30 и 50 метров, соответственно. Сейсмическая волна в грунте принимается в виде бегущей волны синуса; допустим, волна распространяется со скоростью 1000 м/с, период колебания $T = 0.1$ с, амплитуда колебания $A = 4$ мм. Оба участка подземного трубопровода из стали одинаковой марки имеют одинаковый диаметр $D = 0.2$ м. Масса первого и третьего колодцев по 100 кг, а второй имеет массу 1000 кг. Учитывая выше упомянутые допущения, мы можем найти длину сейсмической волны, она равняется $\lambda = C_p \cdot T = 100$ м.

Расстояние между колодцами 30 и 50 метров, т.е. между колодцами расположены трубопроводы длиной $l_1 = 30$ и $l_2 = 50$ метров. Длина сейсмической волны больше длины первого $l_1 < \lambda$ и второго $l_2 < \lambda$ участков подземного трубопровода.

На рисунке 1, а показано изменение перемещения первого колодца по времени. Отсюда видно, что максимальное перемещение колодца равно приблизительно 0.00375 м, когда максимальное перемещение грунта задаётся равным 0.004 м. Если эти данные написать в процентном соотношении, они равны 6.25 %.

Масса узла значительно влияет на напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода, это подтверждает следующий рисунок 2, б. Здесь показано перемещение трубопровода в сечениях $x = 20$ м, $x = 40$ м и $x = 70$ м. Перемещение трубопровода в сечении $x=40$ м относительно больше остальных.

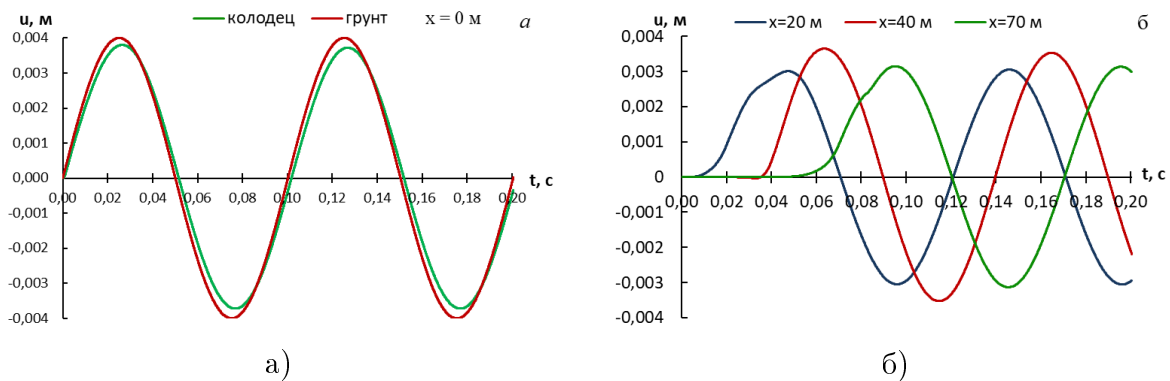


Рис. 2 Изменение перемещения по времени при $x = 0$ м (а) и в сечениях 20м, 40м и 70 м (б)

Теперь рассмотрим случай, при котором длина сейсмической волны меньше или равна длине участков трубопроводов. На рисунке 2, а приведена иллюстрация результатов расчёта при $C_p = 1000$ м/с и $C_p = 300$ м/с. Видны отличия результатов для разных значений скорости распространения. Длина сейсмической волны при $C_p = 1000$ м/с равна 100 м, а при 300 м/с равна 30 м.

Результаты исследования показывают, что перемещение подземного трубопровода уменьшается с уменьшением скорости распространения волны. На рисунке 3, б, в, г представлены сравнительные графики для двух значений скорости распространения волны, т.е. при $C_p = 300$ м/с и $C_p = 1000$ м/с. Из этих графиков видно, что перемещение трубопровода на 0.75% меньше при $C_p = 300$ м/с, чем при $C_p = 1000$ м/с.

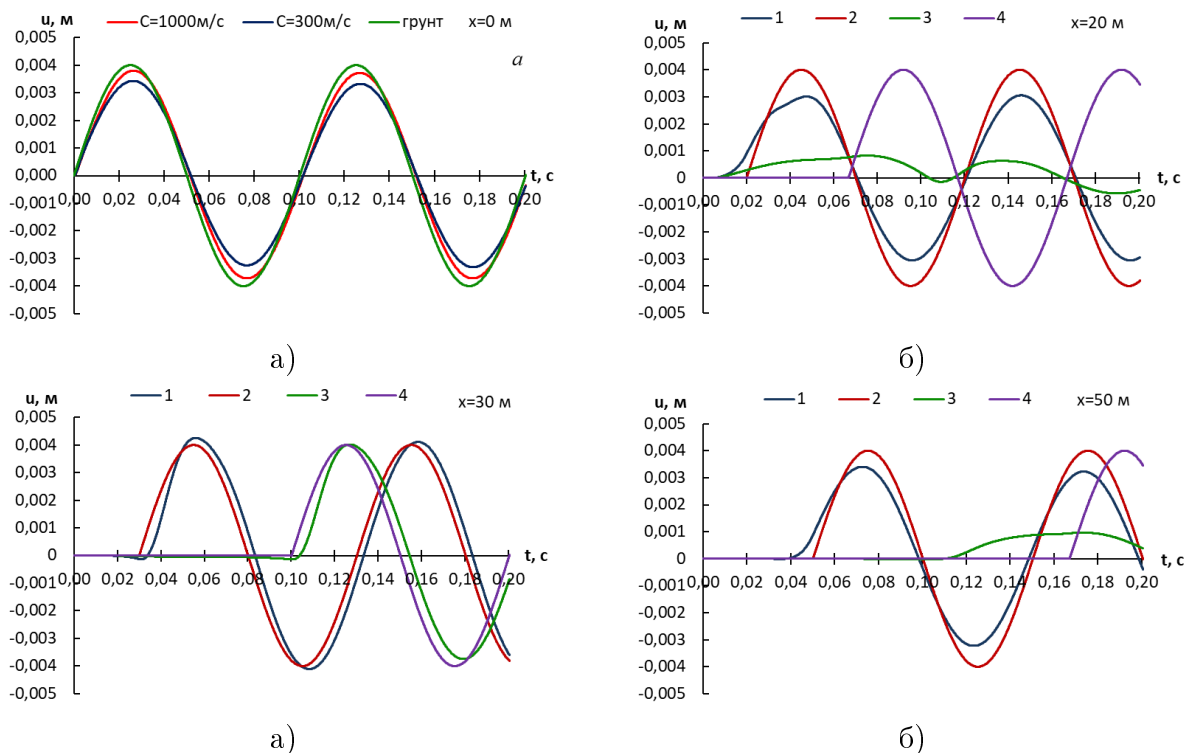


Рис. 3 Изменение перемещения по времени, при $x = 0$ м (а), при $x = 20$ м (б), при $x = 30$ м (в) и при $x = 50$ м (г): 1-труба при $C_p = 1000$ м/с; 2-грунт при $C_p = 1000$ м/с; 3-труба при $C_p = 300$ м/с; 4-грунт при $C_p = 300$ м/с;

На рисунках 4, а, б, показаны изменения перемещений по координате при $C = 300$ м/с. Результаты исследования показывают, что до перехода фронта волны в грунте третьего колодца, максимальное перемещение трубопровода приблизительно равно перемещению грунта. Это подтверждает рисунок 4, при $t = 0.03$ с фронт волны в грунте достигает сечения $x = 9$ м, а при $t = 0.07$ с достигает сечения $x = 21$ м.

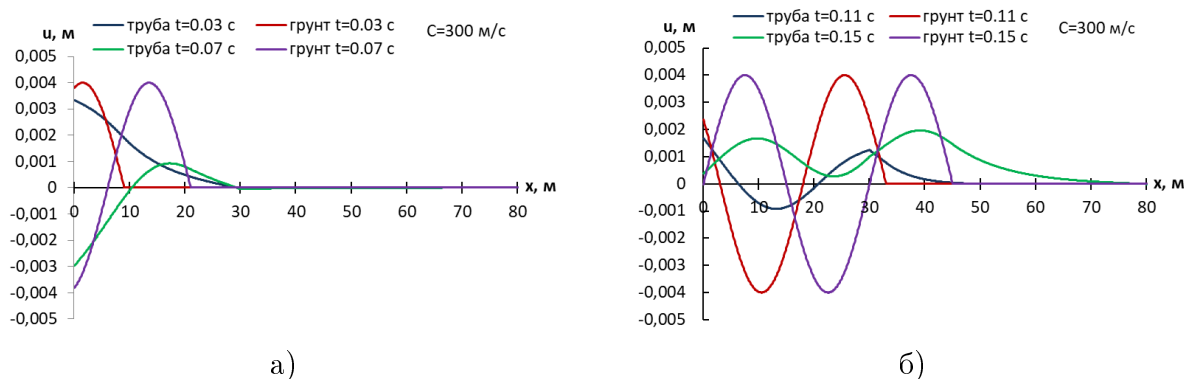


Рис. 4 Изменение перемещений по координате при $C = 300$ м/с

На рисунках 5, а и б показаны результаты для случая, когда длина волны в грунте больше длины трубопроводов, расположенных между узлами. В этом случае перемещение трубопровода и грунта имеет незначительное отличие.

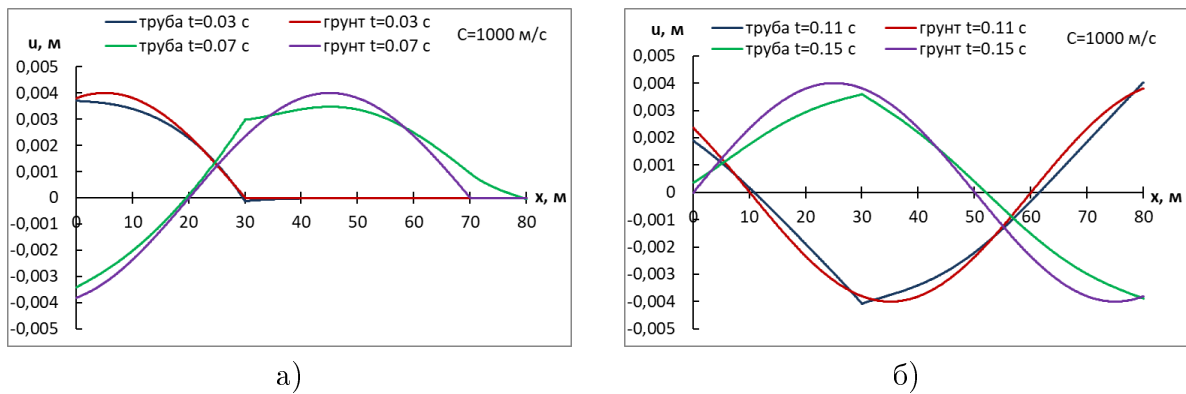


Рис. 5 Изменение перемещений по координате при $C = 1000$ м/с

Результаты, показанные на рисунке 6, а подтверждают ранее сделанные выводы, т.е. при переходе сейсмической волны на участке, расположенном между первым и вторым колодцами, перемещение трубопровода приблизительно равно перемещению в грунте. При переходе сейсмической волны в грунте второго участка трубопровода, ограниченного вторым и третьим колодцами, перемещение трубопровода приблизительно в два раза меньше перемещения, возникающего в грунте (см. рисунок 6, б).

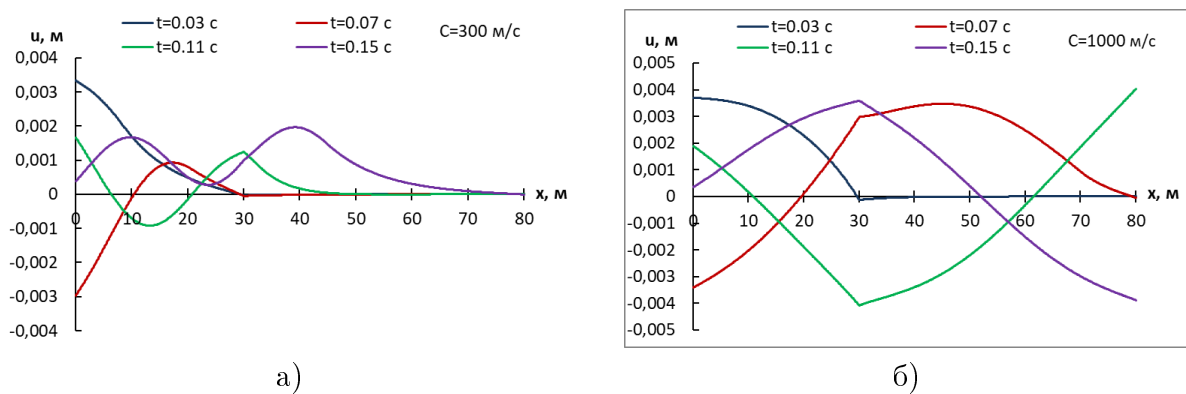


Рис. 6 Изменение перемещений по координате для моментов времени 0.03 с, 0.07 с, 0.11 с и 0.15с

Теперь рассмотрим трубопровод длиной 200 метров. Длина каждого сегмента трубопровода между узлами равна 100 метрам. Сейсмическая волна распространяется со скоростью 500 м/с. Массу каждого колодца принимаем по 500 кг. Период сейсмической волны = 0.1 с, коэффициент упругого взаимодействия системы «колодец-грунт» равен следующему $k_3 = k_4 = k_5 = 4 \cdot 10^4$ кН/м3. Поперечные сечения трубопроводов первого и второго участков одинаковые.

Перемещение трубопровода в сечении, расположенном на расстоянии 30 метров от первого колодца, в 2.1 раза меньше перемещения грунта (см. рисунок 7). На рисунке 8 показано перемещение колодцев по времени, отсюда можно увидеть, что перемещение колодца увеличивается на некоторое значение относительно перемещения предыдущего колодца. Разница перемещений между i -ой и $i + 1$ -ой зависит от

ряда параметров, например, от расстояния между колодцами, характеристик материала трубопровода, характеристик сейсмической волны и характеристик колодцев. Учитывая характеристики трубы, колодцев и грунта, можно определить следующие закономерности.

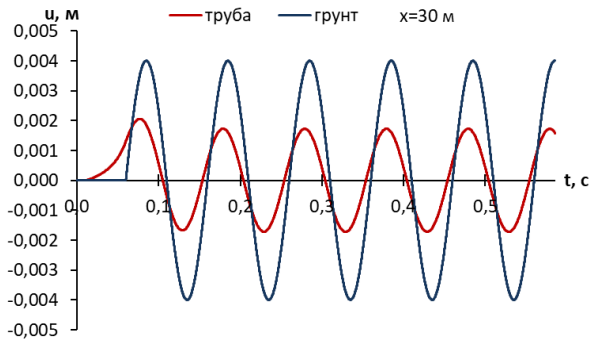


Рис. 7 Изменение перемещений по времени для сечения трубопровода $x = 30$ м

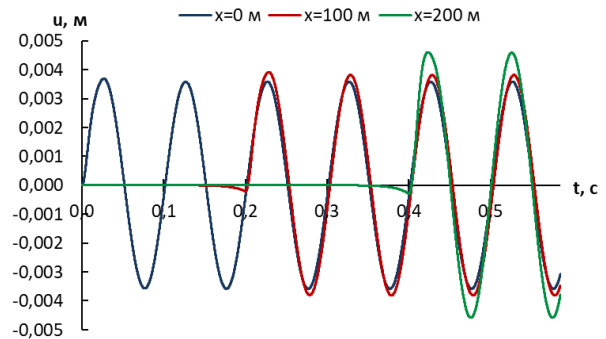


Рис. 8 Изменение перемещений колодцев по времени

Теперь сравним перемещения трубопровода в сечениях 30, 50 и 90 метров на первом участке трубопровода и в сечениях 120, 150 и 180 метров на втором участке трубопровода.

Когда фронт волны находится на первом участке трубопровода, второй и третий колодцы находятся в покое, за счёт чего на интервале времени, когда фронт волны находится между первым и вторым колодцем, максимальные значения перемещений равны 0.0021 м, а затем максимальные значения перемещений трубопровода уменьшаются до 0.0018 м и остаются неизменными (см. рис. 9, а).

Точно такие же явления встречаются в сечениях 120, 150 и 180 метров. Здесь тоже до достижения фронта сейсмической волны третьего колодца максимальные значения перемещений равны 0.00235 м и после перехода фронта волны через третий колодец, максимальные значения перемещений стабилизируются и принимают отметку 0.002 м (см. рис.9, б).

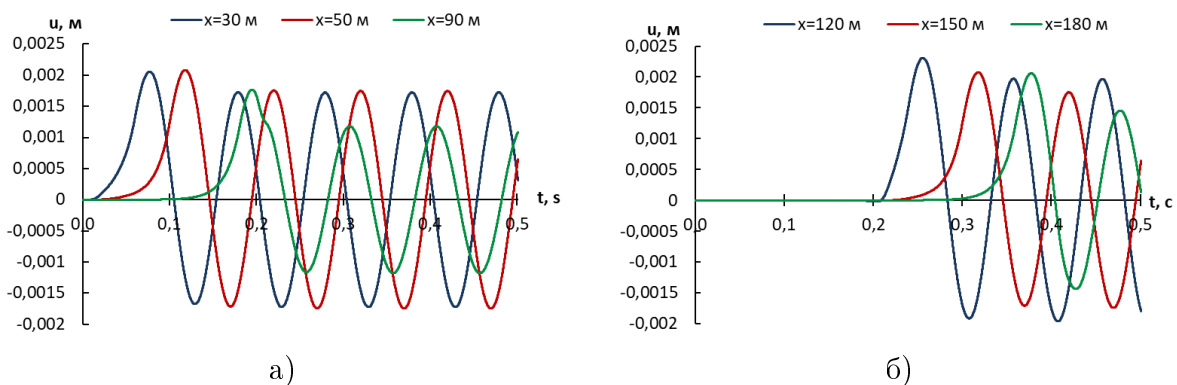


Рис. 9 Изменение перемещений подземного трубопровода по времени.

Теперь сравним значения перемещений в сечениях $x = 30$ м и $x = 120$ м. Перемещения при $x = 120$ м больше, чем при $x = 30$ м, это можно объяснить следующим образом, в сечениях, близко расположенных к колодцам, перемещение будет относи-

тельно больше, чем в сечениях, отдалённых от колодцев. К данному выводу привели результаты расчётов, показанные на рисунках 10, а и б.

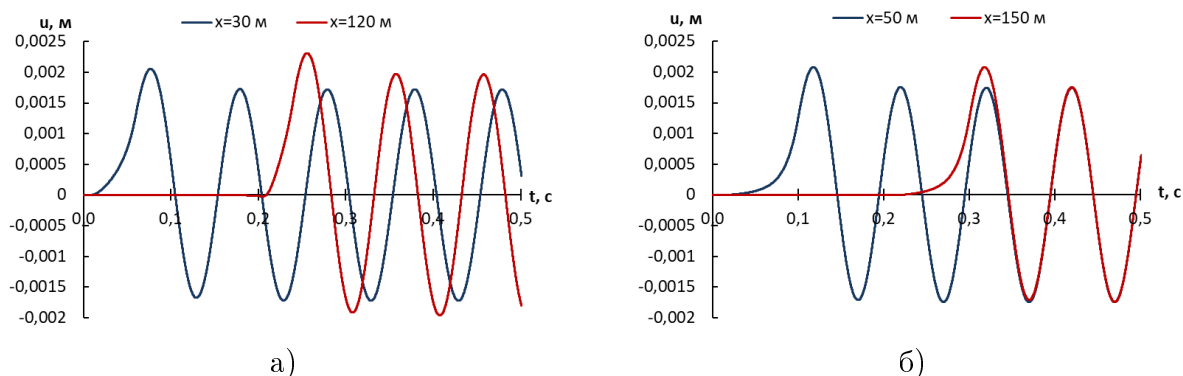


Рис. 10 Изменение перемещений подземного трубопровода по времени

На рисунке 11, а показано изменение деформации подземного трубопровода по времени для сечений трубопровода $x = 30$ м, $x = 50$ м и $x = 90$ м. Максимальные значения деформации при $x = 30$ м равны 0.00023, при $x = 50$ м равны 0.00024, при $x = 90$ м равны 0.00031. Чем ближе сечение к колодцу, тем больше деформация трубопровода.

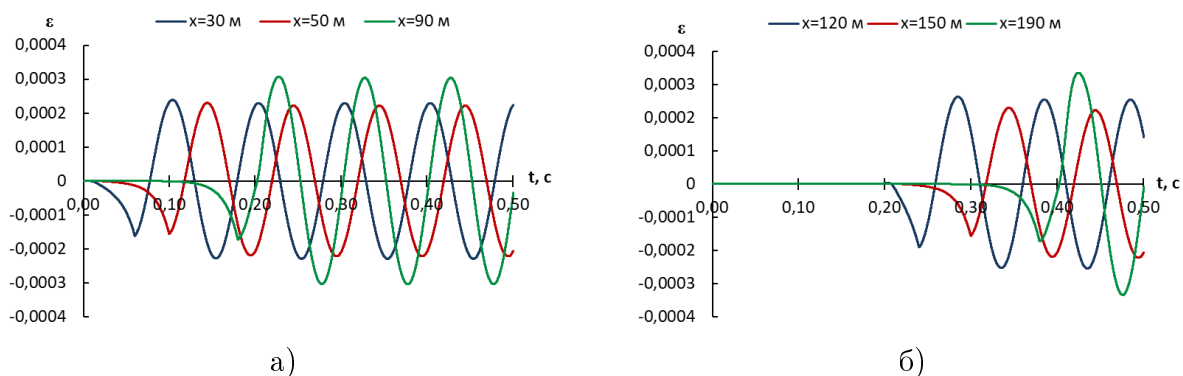


Рис. 11 Изменение деформации по времени

В точках, лежащих близко к окрестности фронта сейсмической волны, значения перемещений на трубопроводе значительно больше, чем в точках, отдалённо расположенных от фронта сейсмической волны.

5 Заключение

Если длина трубопровода, расположенного между колодцами, больше длины сейсмической волны, тогда перемещения, возникающие в её сечениях, в разы меньше перемещений грунта соответствующей точки.

Перемещения в сечениях трубопровода, близко расположенных к колодцу, меньше, чем в сечениях, отдалённых от колодцев. Увеличение габарита колодца приводит к увеличению перемещений колодца до значения, приблизительно равного перемещению грунта в точке, соответствующей координате колодца.

Литература

- [1] *O'Rourke T.D.* Geohazards and large geographically distributed systems // *Geotechnique*. – 2010. – Vol. 60. – P. 503-543.
- [2] *Рашидов Т.* Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. – Ташкент: Фан, 1973. – 180 с.
- [3] *O'Rourke M.J., Liu X.* Response of buried pipelines subject to earthquake effects / Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research; University at Buffalo. – Buffalo, 1999. – 252 p.
- [4] *Iwamoto T., Wakai N., Yamaji T.* Observation of dynamic behavior of ductile iron pipelines during earthquakes // *Proc. of the 8th World Conf. on Earthquake Engineering*. Vol. VII. – San Francisco, 1984. – P. 231-238.
- [5] *O'Rourke T.D., Wang Y., Shi P.* Advances in lifeline earthquake engineering // *Proc. of the 13th World Conf. on Earthquake Engineering*. – Vancouver, 2004.
- [6] *Wang LRL.* Some aspects of seismic resistant design of buried pipelines // *Lifeline earthquake engineering: buried pipelines, seismic risk and instrumentation / American Society of Mechanical Engineers*. – 1979. – P. 117-131.
- [7] *Рашидов Т.* Дифференциальное уравнение колебания подземного трубопровода при землетрясении // *Доклады АН УзР*. – 1962. – №9. – С. 10-12.
- [8] *Newmark N.M.* Problems in wave propagation in soil and rocks // *Proc. of the Int. Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials / University of New Mexico Press*. – 1967. – P. 7-26.
- [9] *Мукурдумов Р.М.* Вопросы сейсмостойкости подземных трубопроводов. – Ташкент, 1953.
- [10] *Напетваридзе Ш.Г.* Сейсмостойкость гидротехнических сооружений. – М.: Госстройиздат, 1959. – 216 с.
- [11] *Рашидов Т.* Расчёт подземных трубопроводов конечной длины на действие кратковременной сейсмической нагрузки // *Доклады АН УзР*. – 1963. – №4. – С. 13-16.
- [12] *De Martino G. et al.* Dynamic response of continuous buried pipes in seismic areas // *ASCE Pipelines Conference*. – 2006.
- [13] *Corrado V. et al.* Inertial Effects on Finite Length Pipe Seismic Response // *MPE*. – 2012. – Vol. 2012, Issue 1. – doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/824578>.
- [14] *Mirsaidov M.M., Abdikarimov R.A., Khodzhaev D.A.* Dynamics of a viscoelastic plate carrying concentrated mass with account of physical nonlinearity of material // *PNRPU Mech Bull*. – 2019. – No. 2. – P. 143-155.
- [15] *Abirov R.A., Khusanov B.E., Sagdullaeva D.A.* Numerical modeling of the problem of indentation of elastic and elastic-plastic massive bodies // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2020. – Vol. 971. – doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/971/3/032017>.
- [16] *Mirsaidov M.M., Usarov M.K.* Bimoment theory construction to assess the stress state of thick orthotropic plates // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2020. – Vol. 614. – doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012090>.
- [17] *Бородавкин П.П.* Подземные магистральные трубопроводы : проектирование и строительство. – М.: Недра, 1982. – 384 с.
- [18] *Khusainov R., Yarashov J., Khusainov S.* Application of finite difference method for solving problem of seismic resistance of underground pipelines // *E3S Web of Conferences*. – 2023. – Vol. 401. – doi: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202340105046>.
- [19] *Khusainov R.B., Yuldoshev B.Sh., Abdullaev D., Khusainov S.B.* Longitudinal vibrations of underground pipelines of finite length in medium surrounded by soil with different properties

- along pipeline length // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 401. – doi: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202340104060>.
- [20] *Rakhmankulova B., Mirzaev S., Khusainov R., Khusainov S.* Underground main pipeline behavior under a travelling impulse in the form of a triangle // E3S Web Conf. – 2021. – Vol. 264. – doi: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202126401006>.
- [21] *Rakhmankulova B. et al.* Inertia force effect on longitudinal vibrations of underground pipelines // E3S Web Conf. – 2021. – Vol. 264. – doi: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202126401007>.
- [22] *Султанов К.С.* Волновая теория сейсмостойкости подземных сооружений. – Ташкент: ФАН, 2016. – 392 с.
- [23] *Sultanov K.S., Khusanov B.E., Rikhsieva B.B.* Mathematical model of underground structure-soil interaction // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2020. – Vol. 962. – doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/962/3/032021>.
- [24] *Khusainov, R.B., Khusainov, S.Вu. Khusainova, B.B.* Seismodynamics of Underground Pipelines Under Viscous-Elastic-Plastic Interaction with Soil // Soil. Mech. Found. Eng. – 2023. – Vol. 59. – P. 544–552.
- [25] *Sultanov K.S., Khusanov B.E., Rikhsieva B.B.* Longitudinal waves in a cylinder with active external friction in a limited area // Journal of Physics: Conf. Series. – 2020. – Vol. 1546. – doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012140>.
- [26] *Sultanov K.S. Khusanov B.E. Rikhsieva B.B.* Elastic wave propagation in a cylinder with external active friction // Journal of Physics: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 1901. – doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012125>.
- [27] *Sultanov K.S., Khusanov B.E., Rikhsieva B.B.* Stress waves in a cylindrical body interacting with external medium // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. and Eng. – 2020. – Vol. 971.
- [28] *Калиткин Н.Н.* Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

Поступила в редакцию 14.05.2024

UDC 539.3

VIBRATIONS OF SYSTEMS CONSISTING OF UNDERGROUND PIPELINES AND WELLS UNDER THE IMPACT OF SEISMIC WAVES

^{1,2}*Khusainova B.B.*, ^{3,4}*Khusainov S.B.*, ^{1,5*}*Khusainov R.B.*

*r.khusainov89@yandex.com

¹University of Geological Sciences,

64, Olimlar str., Tashkent, 100164 Uzbekistan;

²Tashkent branch of Plekhanov Russian University of Economics,

3, Shakhriobod str., Tashkent, 100164 Uzbekistan;

³Bauman Moscow State Technical University,

5, 2nd Baumanskaya str., Moscow, 105005 Russia;

⁴Tashkent State Transport University,

1, Temiryulchilar str., Tashkent, 100167 Uzbekistan;

⁵Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures,

33, Durman yuli str., Tashkent, 100125 Uzbekistan.

The problem of the impact of a longitudinal wave on a system consisting of successively located wells and pipelines of finite length, interacting with soil by elastic-viscous

law is considered in the article. The ends of the pipeline are fixed to massive wells that have volume and mass. The size of the largest well is significantly less than the length of the pipeline, so the deformation of the well can be ignored, i.e. the well can be considered an absolutely solid body. We believe that for each section of the pipeline bounded by wells, the characteristics of the soil and pipeline differ. The problem is solved numerically using an explicit finite difference method. A longitudinal wave in soil acts as a traveling sine wave. The study provides a comparative analysis of the results for certain values of the elastic and viscous interaction coefficients and wave propagation velocity. The results of the study showed that the well has a significant impact on the stress state of the pipeline.

Keywords: pipe, soil, interaction, vibration, elasticity, strain, well.

Citation: Khusainova B.B. Khusainov S.B. Khusainov R.B. 2024. Vibrations of systems consisting of underground pipelines and wells under the impact of seismic waves. *Problems of Computational and Applied Mathematics*. 3(57): 77-90.

HISOBLASH VA AMALIY
МАТЕМАТИКА
MUAMMOLARI

ПРОБЛЕМЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
И ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ

PROBLEMS OF COMPUTATIONAL
AND APPLIED MATHEMATICS



ПРОБЛЕМЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ

№ 3(57) 2024

Журнал основан в 2015 году.

Издается 6 раз в год.

Учредитель:

Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и
искусственного интеллекта.

Главный редактор:

Равшанов Н.

Заместители главного редактора:

Азамов А.А., Арипов М.М., Шадиметов Х.М.

Ответственный секретарь:

Ахмедов Д.Д.

Редакционный совет:

Азамова Н.А., Алоев Р.Д., Амиргалиев Е.Н. (Казахстан), Бурнашев В.Ф.,
Загребина С.А. (Россия), Задорин А.И. (Россия), Игнатъев Н.А.,
Ильин В.П. (Россия), Исмагилов И.И. (Россия), Кабанихин С.И. (Россия),
Карачик В.В. (Россия), Курбонов Н.М., Маматов Н.С., Мирзаев Н.М.,
Мирзаева Г.Р., Мухамадиев А.Ш., Назирова Э.Ш., Нормуродов Ч.Б.,
Нуралиев Ф.М., Опанасенко В.Н. (Украина), Расулмухамедов М.М., Расулов А.С.,
Садуллаева Ш.А., Старовойтов В.В. (Беларусь), Хаётов А.Р., Халджигитов А.,
Хамдамов Р.Х., Хужаев И.К., Хужаеров Б.Х., Чье Ен Ун (Россия),
Шабозов М.Ш. (Таджикистан), Dimov I. (Болгария), Li Y. (США),
Mascagni M. (США), Min A. (Германия), Schaumburg H. (Германия),
Singh D. (Южная Корея), Singh M. (Южная Корея).

Журнал зарегистрирован в Агентстве информации и массовых коммуникаций при
Администрации Президента Республики Узбекистан.

Регистрационное свидетельство №0856 от 5 августа 2015 года.

ISSN 2181-8460, eISSN 2181-046X

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

За точность фактов и достоверность информации ответственность несут авторы.

Адрес редакции:

100125, г. Ташкент, м-в. Буз-2, 17А.

Тел.: +(998) 712-319-253, 712-319-249.

Э-почта: journals@airi.uz.

Веб-сайт: <https://journals.airi.uz>.

Дизайн и вёрстка:

Шарипов Х.Д.

Отпечатано в типографии НИИ РЦТИИ.

Подписано в печать 28.06.2024 г.

Формат 60x84 1/8. Заказ №3. Тираж 100 экз.

Содержание

<i>Равшанов Н., Ахмедов Д., Убайдуллаев М., Насруллаев П.</i> Лагранжева модель движения дисперсной фазы в турбулентной атмосфере	5
<i>Маликов З.М., Назаров Ф.Х., Абдухамидов С.К.</i> Численный расчет турбулентного течения в канале с препятствием на основе программы Comsol Multiphysics	26
<i>Холияров Э.Ч., Тураев Д.Ш., Буриев Ж.Н.</i> Численное решение граничной обратной задачи для уравнения релаксационной фильтрации	36
<i>Равшанов Н., Муродуллаев Б.Т., Боборахимов Б.И.</i> Численное моделирование фильтрации подземных вод на орошаемых территориях	47
<i>Анарова Ш.А., Шокиров Д.А.</i> Вычислительный алгоритм расчета трёхслойных стержней при пространственных нагрузках	57
<i>Хусаинова Б.Б., Хусаинов С.Б., Хусаинов Р.Б.</i> Колебания систем, состоящих из подземных трубопроводов и колодцев, при действии сейсмической волны	77
<i>Равшанов Н., Набиева И., Жапаров Б.Т.</i> Сопряженная задача для оптимального размещения промышленных объектов	91
<i>Юсупов М.</i> Математическое моделирование нелинейных колебаний виброзащитных устройств лежащих на вязкоупругом слое	106
<i>Рахмонов З.Р., Урунбаев Ж.Э.</i> Численное решение задачи кросс диффузии с нелинейными граничными условиями и источником	114
<i>Юсупов Ф.А.</i> Моделирование динамики распространения компьютерных вирусов с помощью композиций отображений Лотки – Вольтерры	122