

Нестационарные волны в протяженном подземном трубопроводе при сейсмическом воздействии

И. МИРЗАЕВ*, Ж. Ф. ШОМУРОДОВ

Ташкентский государственный транспортный университет, 100067, Ташкент, Узбекистан

*Контактный автор: Мирзаев Ибрахим, e-mail: ibrakhim.mir@mail.ru

Поступила 03 апреля 2023 г., доработана 07 апреля 2023 г., принята в печать 18 апреля 2023 г.

Объектом исследования является протяженный подземный трубопровод, подверженный воздействию распространяющейся вдоль его оси сейсмической волны. Рассмотрены задачи о действии длинных волн на протяженный подземный трубопровод. В случае нелинейного взаимодействия трубопровода с грунтом динамические процессы описываются нелинейным волновым уравнением Клейна – Гордона. Методом конечных разностей решена задача о воздействии сейсмической волны разной формы на протяженный подземный трубопровод. Решены задачи о линейном и нелинейном взаимодействии трубопровода с грунтом и проанализированы полученные результаты. Из аналитического решения стационарной задачи для бесконечного трубопровода при синусоидальном воздействии известно, что если скорость распространения волны в грунте больше скорости распространения волны в трубопроводе, в последнем максимальная деформация в два раза больше максимальной деформации в грунте. На основе численного решения нестационарной задачи для конечного трубопровода установлено, что только разрыв на фронте волны деформации в грунте приводит к этому явлению. Если нет разрывов, то по мере снижения скорости деформации в грунте максимальная деформация в трубопроводе за фронтом волны снижается и стремится к максимальной деформации грунта. Исследованиями одномерной задачи о действии сейсмической волны на протяженный подземный трубопровод обоснована применимость неявных разностных схем с практически необходимым шагом по времени для решения задач сейсмомодинамики пространственно-расположенных подземных систем трубопроводов.

Ключевые слова: разностная схема, волна, грунт, трубопровод, упругость, пластичность, разрушение, сухое трение.

Цитирование: Мирзаев И., Шомуродов Ж.Ф. Нестационарные волны в протяженном подземном трубопроводе при сейсмическом воздействии. Вычислительные технологии. 2023; 28(3):10–24. DOI:10.25743/ICT.2023.28.3.002.

Введение

Наблюдения за последствиями сильных и очень сильных землетрясений показывают, что надземные здания и сооружения без сеймозащитных мероприятий испытывают повреждения и разрушения, подземные трубопроводы получают повреждения в виде разрыва стыков и самих труб. Несмотря на то что подземные сооружения обеспечены естественной сейсмоизоляцией, очень сильные и катастрофические землетрясения выводят системы жизнеобеспечения из строя. Поэтому изучение

сейсмодинамических процессов в подземных трубопроводах под воздействием землетрясений стало одним из важных направлений механики. Обзоры теоретических и экспериментальных исследований по математическому моделированию динамических процессов в подземных трубопроводах при воздействии сейсмических волн приведены в работах [1–6]. Экспериментальные исследования показывают, что состояние подземного трубопровода под воздействием сейсмических волн изменяется в основном в зависимости от характеристик грунта и действующих через грунт сейсмических волн [7, 8]. Модель взаимодействия трубопровода с грунтом, предложенная в [7, 9], не является универсальной и не полностью отражает нелинейный характер диаграммы “касательное напряжение — относительное перемещение”, имеется разрыв касательного напряжения в начале разгрузки, переход в состояние структурного разрушения в основном связан с уменьшением динамического давления в грунте. Поэтому в работах [10, 11] исследованы закономерности возникновения и распространения волн деформаций в трубопроводе в случае кусочно-линейной аппроксимации нелинейной диаграммы, определенной экспериментально, при меньшей скорости распространения волны в грунте по сравнению со скоростью распространения волны в трубопроводе. Подземные трубопроводы располагаются близко к дневной поверхности, у сейсмических волн имеются три составляющих, деформации грунтов имеют нелинейный характер, поэтому требуется постановка трехмерной нелинейной динамической контактной задачи механики деформируемого твердого тела, решение которой связано с большими трудностями.

Значительное различие физико-механических характеристик трубопровода и окружающего грунта в процессе деформирования приводит к локализации сдвигов [12, 13] в грунте непосредственно около трубопровода. Поскольку сейсмические волны низкочастотные, строятся упрощенные модели взаимодействия трубопровода с грунтом, в них не учитываются отраженные (дифрагированные) волны от трубопровода, а распространяющаяся волна в грунте считается заданной. Рассмотрены различные упрощенные модели взаимодействия протяженного подземного трубопровода с грунтом [7–11, 14–16]. В [17] впервые получены аналитические решения задачи о воздействии стационарной гармонической волны на бесконечный подземный трубопровод при разных отношениях скоростей распространения волн в грунте и трубопроводе. Сравнение результатов исследований, полученных по разным моделям взаимодействия трубопровода с грунтом, с учетом разрушения структуры грунта и идеального упругопластического тела показало, что в практических расчетах для сейсмических волн можно использовать модель в форме идеального упругопластического тела [10, 11, 16]. Численное решение осесимметричной контактной задачи сейсмодинамики подземных трубопроводов при действии синусоидальной волны получено методом конечных элементов до момента времени 0.04 с [18]. В работе [19] при численном решении одномерной волновой задачи с разрывами на фронте волны напряжения показано, что паразитные осцилляции отсутствуют, если использовать при конечно-разностной аппроксимации предельное условие устойчивости Куранта.

Представляет определенный интерес поведение протяженного подземного трубопровода, когда поверхностная сейсмическая волна воздействует на трубопровод под углом. Наклонная волна может быть представлена в виде продольных и поперечных волн, распространяющихся вдоль трубопровода с “видимыми” скоростями, большими скорости падающей волны [15, 20].

Сейсмодинамика протяженного подземного трубопровода по нелинейной модели взаимодействия трубопровода с грунтом [14] описывается нелинейным уравнением Клейна–Гордона [21, 22]

$$u_{tt} - c^2 u_{xx} + F(u) = 0. \quad (1)$$

В настоящей работе нестационарные задачи о действии длинных волн на протяженный подземный трубопровод в линейных и нелинейных моделях взаимодействия трубопровода с грунтом решаются методом конечных разностей. Целью исследования является выявление закономерностей воздействия волн деформации, в частности сейсмической волны, в грунте на формирование и распространение продольных волн в трубопроводе.

1. Постановка задачи и методы

Рассмотрен протяженный подземный трубопровод длиной L . Пусть по грунту вдоль трубопровода со скоростью c_g распространяется волна со скоростью частиц $v_g(t - x/c_g)$, значение c_g зависит от угла падения волны к оси трубопровода [15]. Начало координатной оси Ox расположено на левом торце трубопровода.

Уравнение (1) для протяженного подземного трубопровода, взаимодействующего с окружающим его грунтом, представлено в виде [10, 11]

$$\frac{\partial v}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{\pi D}{F\rho} \tau(x, t, u_g - u), \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (2)$$

где $\tau(x, t, u_g - u)$ — касательное напряжение, возникающее на поверхности контакта трубопровода с грунтом; ε , v , u — деформация, скорость и перемещение по оси трубопровода; $u_g = u_g(x, t)$ — заданное перемещение в грунте.

Функция $\tau(x, t, u_g - u)$, отражающая диаграмму “касательное напряжение — относительное перемещение”, определяется из эксперимента на взаимодействия трубопровода с грунтом [7, 8, 14]. Ее можно аппроксимировать набором функций с учетом их непрерывной стыковки [7, 9], а в настоящей работе используется кусочно-линейная модель взаимодействия, как показано на рис. 1. Для отслеживания положения $\tau(x, t, u_g - u)$

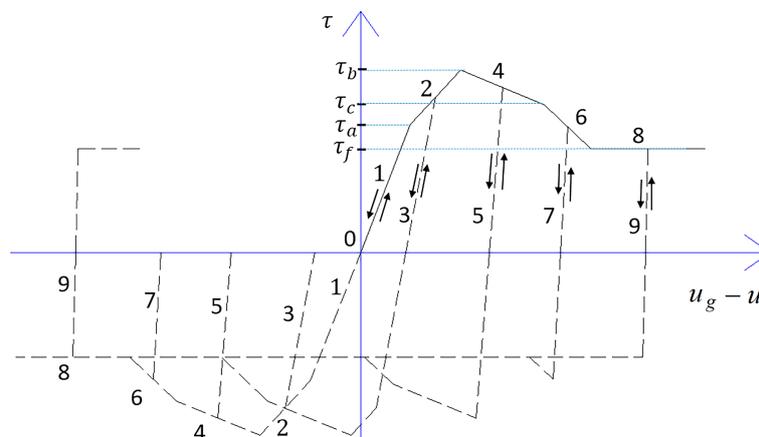


Рис. 1. Диаграмма зависимости $\tau = \tau(x, t, u_g - u)$, соответствующая кусочно-линейной модели взаимодействия трубопровода с грунтом

Fig. 1. Dependence diagram $\tau = \tau(x, t, u_g - u)$ corresponding to the piecewise linear model of pipeline-soil interaction

на диаграмме вводим целочисленную функцию $S(x, t)$, которая определяет, в какой кусочно-линейной части диаграммы происходит деформирование грунта. Здесь значения $S(x, t)$ приведены от 1 до 9.

Для задания кусочно-линейной модели необходимо определить точки на диаграмме, в которых меняются углы наклонов отрезков, а также принять закономерность разгрузки и структурного разрушения. Условие нагружения можно описать следующим образом:

$$\tau = \begin{cases} \tau_s + k_s(u_g - u - U_s), & S(x, t) = s \text{ при } |\tau_s| \leq |\tau|, \\ S(x, t) = s - 1 & \text{при нагружении,} \\ \tau_s + k_s(u_g - u - U_s) & \text{при } S(x, t) = s \text{ и } |\tau_s| \leq |\tau| \leq |\tau_{s+1}|, \end{cases} \quad (3)$$

$\tau_1 = 0, U_1 = 0, s = 1, S(x, t) = 0$ в начале процесса в точке x .

Здесь и далее τ_s и U_s — боковое касательное напряжение и разность перемещений соответствующих точек грунта и трубопровода в момент s -го перехода из одного состояния в другое; k_s — коэффициент взаимодействия поверхности трубопровода с грунтом.

В зависимости от процесса деформирования в точке x может начаться линейная разгрузка, которая определяется как

$$\tau = \begin{cases} \tau_s + k_s(u_g - u - U_s), & S(x, t) = s \text{ при } \tau(v_g - v) < 0, \\ S(x, t) = s - 1 & \text{при начале разгрузки,} \\ \tau_s + k_s(u_g - u - U_s) & \text{при } S(x, t) = s \text{ и } |\tau| \leq |\tau_s|. \end{cases} \quad (4)$$

При превышении $\tau(x, t, u_g - u)$ заданного максимального значения происходит структурное разрушение окружающего трубопровод грунта, которое определяется следующими соотношениями:

$$\tau = \begin{cases} \tau_s + k_s(u_g - u - U_s), & S(x, t) = s \text{ при } \tau_b \leq |\tau|, \\ S(x, t) = s - 1 & \text{— начало разрушения,} \\ \tau_s + k_s(u_g - u - U_s) & \text{при } S(x, t) = s \text{ и } |\tau_{s+1}| \leq |\tau| \leq |\tau_s|, \\ |\tau| > \tau_f & \text{при } k_s < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь τ_b — абсолютное значение предела касательного напряжения, за которым начинается разрушение структуры грунта; τ_f — значение бокового сухого трения. При определенном условии состояние из структурного разрушения может по условию (4) перейти в состояние разгрузки, а затем в состояние сухого трения:

$$\tau = \begin{cases} \operatorname{sgn}(v_g - v)\tau_f, & S(x, t) = s \text{ при } |\tau| \leq \tau_f \text{ — переход из состояния разрушения,} \\ \operatorname{sgn}(v_g - v)\tau_f & \text{при } S(x, t) = s \text{ и } 0 \leq (v_g - v)\tau \text{ — состояние сухого трения.} \end{cases} \quad (6)$$

Выход из состояния разгрузки в состояние, из которого был осуществлен переход, определяется соответствующим условием $|\tau_s| \leq |\tau|$.

В начальный момент времени примем нулевые условия

$$u|_{t=0} = 0 \text{ и } v|_{t=0} = 0.$$

Граничные условия на торцах трубопровода могут быть разными, такими что напряжение на торцах трубопровода равно напряжению грунта, или свободными от напряжений, или жестко закрепленными к грунту и т. д.

Для построения явной конечно-разностной схемы разностную сетку определим по соотношению шагов по координате и по времени $\Delta t = \Delta x/c$, которое является предельным условием устойчивости Куранта.

Система уравнений (2) с соответствующими состояниями (3)–(6) аппроксимируется конечными разностями

$$\frac{v_{i+1/2}^{j+1} - v_{i+1/2}^j}{\Delta t} = c^2 \frac{\varepsilon_{i+1}^{j+1/2} - \varepsilon_i^{j+1/2}}{\Delta x} + \frac{\pi D}{F\rho} \frac{\tau_{i+1/2}^{j+1} + \tau_{i+1/2}^j}{2}, \quad \frac{\varepsilon_{i+1}^{j+1/2} - \varepsilon_i^{j-1/2}}{\Delta t} = \frac{v_{i+1/2}^j - v_{i-1/2}^j}{\Delta x}, \quad (7)$$

где нижний индекс — координата, а верхний — время. Таким же образом происходит аппроксимация $\tau(x, t, u_g - u)$ [10, 11], которая подставлена в (7) и явно вычисляется $v_{i+1/2}^{j+1}$, потом $\varepsilon_{i+1}^{j+1/2}$ на следующем временном шаге. Дискретные значения деформации возьмем на концах отрезков Δx , а скорости частиц — в серединах отрезков Δx . По времени дискретные значения деформации возьмем в середине шага по времени, а скорости частиц — на каждом шаге. Достаточным условием устойчивости разностной схемы является $\max(k_s)(\pi D/F\rho)\Delta t^2 \ll 1$.

В случае нелинейных задач используем итерацию по методу Ньютона–Рафсона, алгоритмы решения задач более полно представлены в [10, 11].

2. Результаты расчетов и их обсуждение

Для обеспечения точности вычислений по явной конечно-разностной схеме проведены расчеты для разных значений Δt , подобранных в зависимости от скорости распространения волны в трубопроводе. Делением на 2 определяем значение, когда дальнейшее деление не приводит к существенному уточнению результатов вычислений. В задачах нелинейного взаимодействия трубопровода с грунтом итерационный процесс продолжается до удовлетворения заданной точности вычисления скоростей частиц трубопровода.

2.1. Скорость распространения волны в грунте меньше скорости распространения в трубопроводе

Рассмотрена задача воздействия волны в грунте в форме импульса на трубопровод в случаях линейной и нелинейной моделей взаимодействия. Вычисления производились при следующих исходных данных, часть которых взята из [8, 9, 11]: $L = 1000$ м, $D = 0.2$ м, $h_D = 0.01$ м, $c_g = 500$ м/с, $c = 5000$ м/с, $k_1 = 10^7$ Н/м³, $k_2 = 0.4 \cdot 10^7$ Н/м³, $k_3 = 1.2 \cdot 10^7$ Н/м³, $k_4 = -0.5 \cdot 10^7$ Н/м³, $k_5 = 1.5 \cdot 10^7$ Н/м³, $k_6 = -0.35 \cdot 10^7$ Н/м³, $k_7 = 1.8 \cdot 10^7$ Н/м³, $k_8 = 0$, $k_9 = 2 \cdot 10^7$ Н/м³, $\tau_a = 24$ кПа, $\tau_b = 27$ кПа, $\tau_c = 15$ кПа, $\tau_f = 11$ кПа, $\Delta t = 0.0001$ с. Оба торца трубопровода свободны от напряжений.

На рис. 2 приведены результаты расчетов с распространяющейся в грунте заданной волной в виде импульса

$$u_g = u_{gm} \sin \frac{2\pi(t - x/c_g)}{t_0} [H(t - x/c_g) - H(t - t_0 - x/c_g)]$$

с амплитудой $u_{gm} = 0.02$ м. Здесь $H(t)$ — функция Хевисайда, $t_0 = 0.33$ с соответствует преобладающему периоду акселерограммы землетрясения.

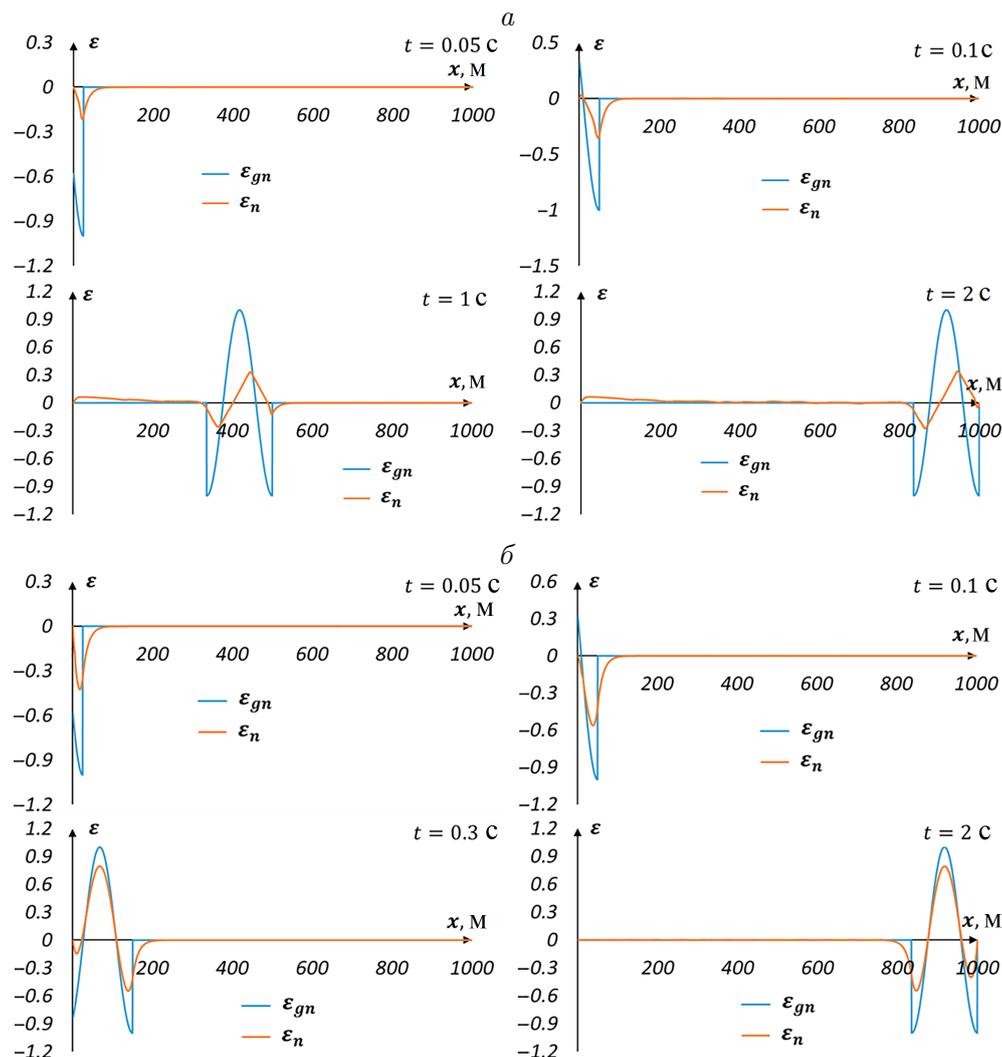


Рис. 2. Нормированные деформации грунта и трубопровода при его нелинейном (а) и линейном (б) взаимодействии с грунтом в различные моменты времени
 Fig. 2. Normalized deformations of the ground and pipeline during its nonlinear (a) and linear (b) interaction with the ground at different points in time

На рис. 2, а в случае нелинейной модели с учетом структурного разрушения и сухого трения в различные моменты времени представлены графики нормированных деформаций грунта $\varepsilon_{gn} = \varepsilon_g / \varepsilon_{gm}$ и трубопровода $\varepsilon_n = \varepsilon / \varepsilon_{gm}$, где ε_{gm} — максимальная деформация грунта в заданной волне, $\varepsilon_{gm} = 0.00076$.

В интервале времени $0.293 < t < 0.3007$ с деформация трубопровода достигает максимального значения ($\varepsilon_{\max} = 0.00031$), оно появляется между 85–90 м от левого торца трубопровода. Когда передний фронт заданного импульса проходит определенное расстояние, волна деформации распространяется в трубопроводе без изменения формы до прихода отраженной от правого торца волны, в этом случае $\varepsilon_{\max} = 0.00026$. Взаимодействие трубопровода с грунтом за фронтом волны проходит состояния упругости, пластичности, разгрузки, разрушения и сухого трения. А перед фронтом волны в грунте по трубопроводу волна распространяется со скоростью c_g и быстро затухает по мере удаления от фронта волны. В участках с сухим трением деформация трубопровода изменяется линейно.

На рис. 2, б представлены эти же величины в случае линейной модели взаимодействия. При $t = 0.2635$ с деформация трубопровода достигает своего максимального значения ($\varepsilon_{\max} = 0.0006$), оно появляется в точке 49.5 м от левого торца трубопровода, далее волна деформации распространяется без изменения до прихода отраженной волны от правого торца.

Из рис. 2 можно видеть, что в случае нелинейной модели взаимодействия распространение волны деформации выходит на стационарный режим почти в два раза позже, чем в линейном случае, при этом максимальная деформация при нелинейной модели в 2.3 раза меньше по сравнению с линейной. При нелинейном взаимодействии наблюдаются остаточные деформации растяжения. Результаты исследования закономерностей формирования и распространения продольной волны в трубопроводе при воздействии гармонической волны приведены в [10, 11].

2.2. Скорость распространения волны в грунте больше скорости распространения в трубопроводе

Такой случай встречается, когда нормаль к фронту волны в грунте с осью трубопровода имеет необходимый угол и когда трубопровод сегментированный с очень податливыми стыковыми соединениями [6, 14, 15].

В [14, 17] получено аналитическое решение стационарной задачи воздействия гармонической волны на бесконечный трубопровод и установлено, что при большей скорости распространения волны в грунте по сравнению со скоростью распространения волны в трубопроводе максимальная деформация в последнем случае в два раза больше, чем в грунте. Проверим этот факт для нестационарной задачи.

Расчет действия гармонической волны перемещения для линейной модели взаимодействия выполнен при $c_g = 6000$ м/с, $c = 5000$ м/с, $t_0 = 0.1$ с. Это случай падения гармонической волны под углом.

На рис. 3 представлены графики нормированных деформаций грунта и трубопровода в моменты времени $t = 0.05$ с и $t = 0.1$ с при $\varepsilon_{gm} = 0.0002$. Видно, что максимальная деформация в трубопроводе в два раза больше, чем в грунте. При этом в трубопроводе появляются высокочастотные волны ($t_1 = 0.01$ с) по сравнению с частотой волны ($t_0 = 0.1$ с) в грунте, область с высокочастотной волной расширяется по мере движения фронта волны. Вычисления по разностной схеме проводились с шагом по времени $\Delta t = 0.0001$ с.

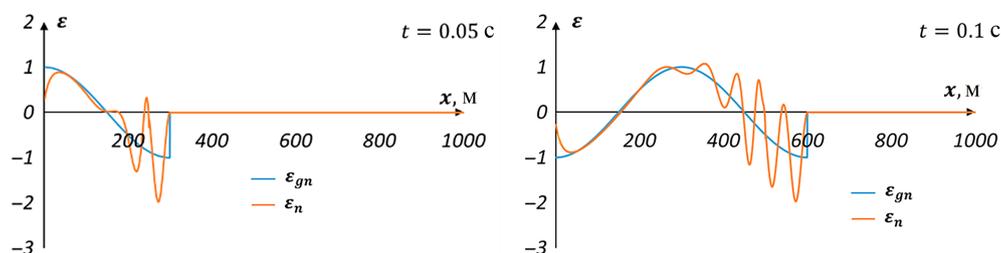


Рис. 3. Нормированные деформации грунта и трубопровода при его линейном взаимодействии с грунтом в различные моменты времени в случае $c_g = 6000$ м/с, $c = 5000$ м/с (при воздействии гармонической волны)

Fig. 3. Normalized deformations of the ground and pipeline during its linear interaction with the ground at different points in time for $c_g = 6000$ м/с, $c = 5000$ м/с (when exposed to a harmonic wave)

Рассмотрим случай сегментированного трубопровода с осредненными значениями жесткости и плотности материала при следующих исходных данных [15, 23]: $L = 1000$ м, $D = 0.61$ м, $h_D = 0.01$ м, $u_{gm} = 0.073$ м, $\varepsilon_{gm} = 0.0009$. Расчет действия гармонической волны перемещения проведен для линейной модели взаимодействия $u_g = u_{gm} \sin \frac{2\pi(t - x/c_g)}{t_0} H(t - x/c_g)$.

На рис. 4, а представлены графики нормированных деформаций грунта и трубопровода в различные моменты времени, из которых следует, что максимальная деформация в трубопроводе в два раза больше максимальной деформации в грунте, а также видно появление высокочастотных волн с периодом $t_1 = 0.01$ с. За фронтом волны образуется стационарная область, расширяющаяся по мере распространения волны, здесь аналитическое и численное решения совпадают с достаточной точностью. Хвост области с удвоенной деформацией имеет вначале период $t_1 = 0.015$ с, далее уменьшается амплитуда осцилляции и увеличивается ее период. Вычисления по разностной схеме проводились с шагом по времени $\Delta t = 0.0005$ с.

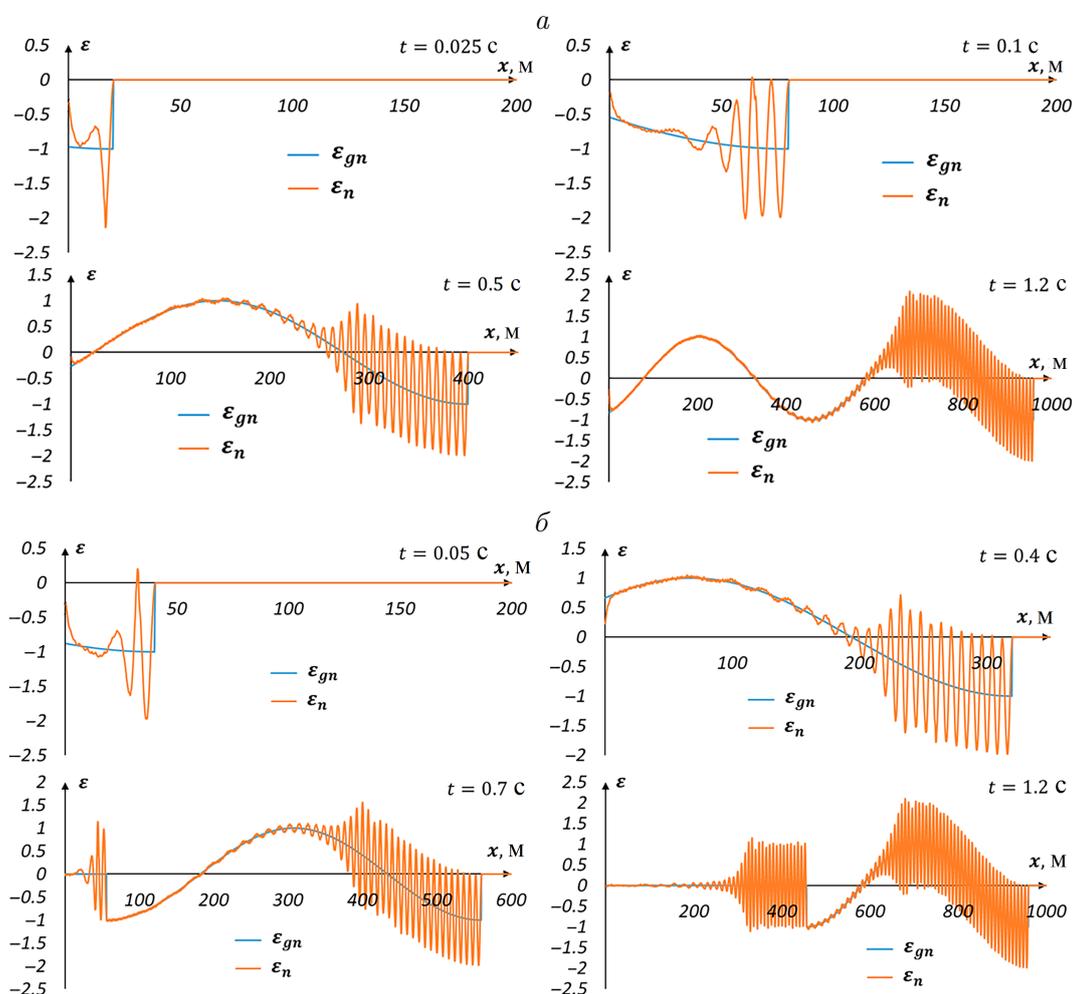


Рис. 4. Нормированные деформации грунта и трубопровода при его линейном взаимодействии с грунтом в различные моменты времени в случае $c_g = 800$ м/с, $c = 660$ м/с, $t_0 = 0.63$ с (при воздействии гармонической волны (а) и волны импульса (б))

Fig. 4. Normalized deformations of the ground and pipeline during its linear interaction with the ground at different points in time in the case $c_g = 800$ м/с, $c = 660$ м/с, $t_0 = 0.63$ с (when exposed to a harmonic (a) and to a pulse (b) wave)

На рис. 4, б приведены результаты расчетов, если заданная волна представлена в виде импульса $u_g = u_{gm} \sin \frac{2\pi(t - x/c_g)}{t_0} [H(t - x/c_g) - H(t - t_0 - x/c_g)]$.

Отличие результатов от гармонической волны состоит в том, что задний фронт волны в виде импульса вызывает высокочастотные волны с такими же периодами, при этом максимальная деформация в трубопроводе за волной в грунте равна максимальной деформации в грунте в зоне действия волны в виде импульса.

Исследовано влияние коэффициента линейного взаимодействия k_x [14] на волновой процесс. На рис. 5 представлены графики нормированных деформаций грунта и трубопровода для линейной модели. Если $k_x = 0.5 \cdot 10^7$ Н/м³, то период осцилляций непосредственно за передним фронтом волны 0.014 с, а далее 0.025 с. При $k_x = 4 \cdot 10^7$ Н/м³ период осцилляций за фронтом волны 0.005 с, а в хвосте 0.008 с.

Если скорость распространения волны в грунте больше скорости в трубопроводе, боковое касательное напряжение не превышает значения начала структурного разрушения слоя грунта. Поэтому приведенные выше результаты были получены для линейной модели взаимодействия.

Увеличение отношения скоростей распространения волн в грунте и трубопроводе соответственно увеличивает значение периода волны за фронтом в трубопроводе и выводит к предельному значению 0.018 с при фиксированном значении $k_x = 1 \cdot 10^7$ Н/м³. Для каждого значения k_x имеется свое предельное значение периода волны за фронтом.

Другие формы волны в грунте с разрывом скорости частиц на фронте также приводят к появлению высокочастотных волн в трубопроводе за фронтом волны. Если разрыв скорости частиц отсутствует, то по мере снижения скорости деформации в грунте максимальная деформация в трубопроводе за фронтом волны снижается и стремится к максимальной деформации грунта, при этом имеют место осцилляции около деформации, равной деформации в грунте.

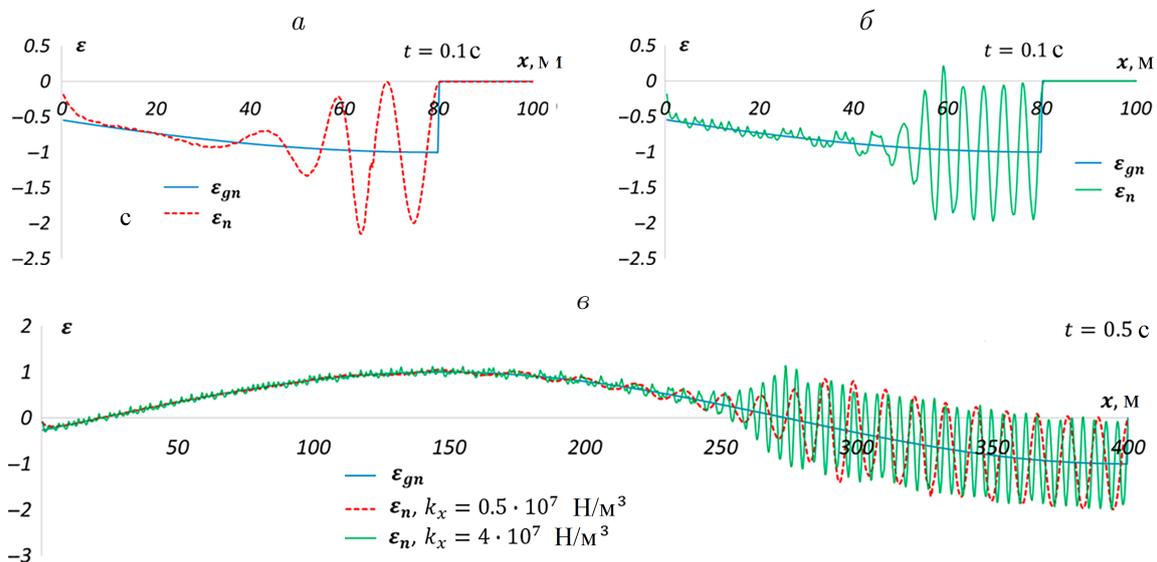


Рис. 5. Нормированные деформации грунта и трубопровода для линейной модели в различные моменты времени в случае $c_g = 800$ м/с, $c = 660$ м/с, $t_0 = 0.63$ с для $k_x = 0.5 \cdot 10^7$ Н/м³ (а и б) и $k_x = 4 \cdot 10^7$ Н/м³ (в и г) (при воздействии гармонической волны)

Fig. 5. Normalized deformations of the ground and pipeline during its linear interaction with the ground at different points in time in the case $c_g = 800$ m/s, $c = 660$ m/s, $t_0 = 0.63$ s for $k_x = 0.5 \cdot 10^7$ N/m³ (a and б) and $k_x = 4 \cdot 10^7$ N/m³ (в and г) (when exposed to a harmonic wave)

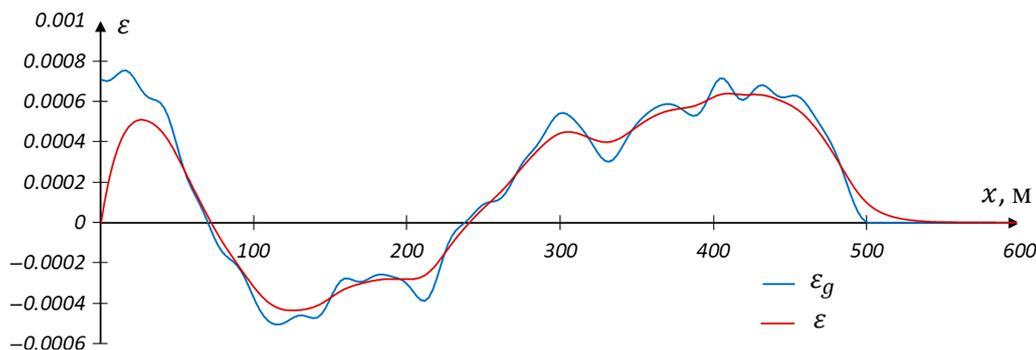


Рис. 6. Деформации грунта и трубопровода в момент времени $t = 1$ с в случае реальной сейсмической волны

Fig. 6. Deformations of the ground and pipeline at the time $t = 1$ s when exposed to a real seismic wave

Поскольку волны скоростей и деформаций в грунте от землетрясений не имеют скачков, приходим к выводу, что, когда отношение скоростей распространения волн в грунте и трубопроводе больше единицы, деформации в них практически одинаковы. Этот факт подтверждается результатами расчетов по акселерограмме Газлийского землетрясения 1976 г. По оцифрованной с шагом 0.005 с акселерограмме методом Ньюмарка были вычислены значения скорости и перемещения с таким же шагом. Далее сплайн-функцией Эрмита было аппроксимировано перемещение для определения его значений для любого момента времени. Этот факт является основанием применения неявных конечно-разностных схем для решения задач сейсмодинамики пространственно-расположенных систем подземных трубопроводов по записям реальных землетрясений [23, 24].

2.3. Действие сейсмической волны по реальной записи землетрясения

Отличие деформаций в трубопроводе от деформаций в грунте проявляется, если скорость распространения волны в грунте меньше скорости распространения волны в трубопроводе [10, 11, 14, 20].

На рис. 6 представлены графики деформаций грунта и трубопровода в момент времени $t = 1$ с для линейной модели на основе реальной записи — акселерограммы при $c_g = 500$ м/с, $c = 5000$ м/с. Вычисления проводились для части акселерограммы, где ее значения достигают максимума.

Заключение

Исследованы процессы формирования и распространения нестационарных волн деформаций в протяженном подземном трубопроводе при сейсмическом воздействии.

Модель нелинейного взаимодействия трубопровода с грунтом описывается нелинейным волновым уравнением Клейна–Гордона. Используются явная конечно-разностная схема с предельным условием устойчивости и итерационный метод уточнения численного решения Ньютона–Рафсона. Если скорость распространения волны в грунте меньше скорости распространения волны в трубопроводе, нелинейное взаимодействие трубопровода с грунтом при воздействии волны деформации в виде импульса приводит к выходу на стационарный режим позже по сравнению с линейным взаимодействием. Максималь-

ная деформация в случае нелинейной модели меньше. При нелинейном взаимодействии наблюдаются остаточные деформации трубопровода.

Если скорость распространения волны в грунте больше скорости распространения волны в трубопроводе, боковое касательное напряжение не превышает значение начала структурного разрушения слоя грунта, что позволяет в этом случае использовать линейную модель взаимодействия трубопровод — грунт. Если передний фронт заданной гармонической волны деформации в грунте имеет разрыв, то за этим фронтом в трубопроводе возникают высокочастотные волны с максимальным значением деформации, в два раза превышающим максимальную деформацию грунта.

Отличие результатов воздействия волны в виде импульса от гармонической волны состоит в том, что за задним фронтом волны в виде импульса появляются высокочастотные волны с такими же периодами, какие были за передним фронтом, при этом максимальная деформация в трубопроводе за волной в грунте равна максимальной деформации заднего фронта волны деформации в грунте. Другие формы волны в грунте с разрывом скорости частиц на фронте также приводят к появлению высокочастотных волн в трубопроводе за фронтом волны. Если разрыв скорости частиц отсутствует, то по мере снижения скорости деформации в грунте максимальная деформация в трубопроводе за фронтом волны снижается и стремится к максимальной деформации грунта, при этом имеют место осцилляции около деформации, равной деформации в грунте.

Поскольку волны скоростей и деформаций в грунте от землетрясений не имеют скачков, приходим к следующему выводу. Если отношение скоростей распространения волн в грунте и трубопроводе больше единицы, деформации в грунте и трубопроводе практически одинаковы. Это также подтверждается результатами расчетов по акселерограмме Газлийского землетрясения и является основанием применения неявных конечно-разностных схем для решения задач сейсמודинамики пространственно-расположенных систем подземных трубопроводов по реальным записям землетрясений.

Список литературы

- [1] **Psyrras N.K., Sextos A.G.** Safety of buried steel natural gas pipelines under earthquake-induced ground shaking: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018; (106):254–277. DOI:10.1016/j.soildyn.2017.12.020.
- [2] **Tsinidis G., Di Sarno L., Sextos A., Furtner P.** A critical review on the vulnerability assessment of natural gas pipelines subjected to seismic wave propagation. Part 1: Fragility relations and implemented seismic intensity measures. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019; (86):279–296. DOI:10.1016/j.tust.2019.01.025.
- [3] **Halkijević I., Vouk D., Posavčić H., Mostečak H.** Damage assessment of water supply networks due to seismic events using vulnerability functions [Procjena oštećenja na vodoopskrbnim mrežama uslijed seizmickih događaja primjenom funkcija ranjivosti]. *Gradjevinar*. 2021; 73(7):737–749. DOI:10.14256/JCE.3185.2021.
- [4] **Xu R., Jiang R., Qu T.J.** Review of dynamic response of buried pipelines. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2021; 12(2):art. no. 03120003. DOI:10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000527.
- [5] **Yousife D.F., Aldefae A.H., Zubaidi S.L., Humaish W.H., Sinichenko E.K.** Static and seismic performance of buried pipelines: A review. *E3S Web of Conferences*. 2021; 318(01011). DOI:10.1051/e3sconf/202131801011.

- [6] **O'Rourke M.J., Liu X.** Response of buried pipelines subject to earthquake effect. The Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Monograph Series. 1999; 276. Available at: <https://ubir.buffalo.edu/xmlui/bitstream/handle/10477/588/99-MN03.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- [7] **Султанов К.С.** Волновая теория сейсмостойкости подземных сооружений. Ташкент: Изд-во Фан АН РУз; 2016: 392. Адрес доступа: <https://www.eruditor.io/file/2097102/?ysclid=lg4thbv6ry829718395>.
- [8] **Massarsch K.R. Massarsch K.R.** Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests. Keynote Lecture, International Conference on Site Characterization, ISC'2, 19–22 Sept. 2004; Porto, 14. Available at: <https://scienceweb.uz/publication/8919>.
- [9] **Sultanov K., Vatin N.** Wave theory of seismic resistance of underground pipelines. Applied Sciences. 2021; 11(1797). DOI:10.3390/app11041797.
- [10] **Mirzaev I., Shomurodov J.F.** Wave processes in an extended underground pipeline interacting with soil according to the model of an “ideal elastoplastic body”. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 1902. DOI:10.1088/1742-6596/1902/1/012017.
- [11] **Mirzaev I., Shomurodov J.F.** Seismodynamics of an extended underground pipeline based on a nonlinear model of interaction with the ground. AIP Conference Proceedings. 2022; 2637(030004). DOI:10.1063/5.0118457.
- [12] **Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И.** О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1974; (3):130–133.
- [13] **Ревуженко А.Ф.** Механика сыпучей среды. Новосибирск: ЗАО ИПП “ОФСЕТ”; 2003: 373. ISBN:5-85957-027-9.
- [14] **Рашидов Т.** Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. Ташкент: Изд-во Фан; 1973: 180. Адрес доступа: <https://www.twirpx.com/file/1141461/?ysclid=lfw47x5ypv135498746>.
- [15] **Israilov M.Sh.** Action of an oblique seismic wave on an underground pipeline. Mechanics of Solids. 2022; (57):1006–1015. DOI:10.3103/s0025654422050089.
- [16] **Баширзаде С.Р., Овчинников И.Г.** Прогнозирование поведения трубопроводных конструкций в сложных грунтово-геологических условиях. Ч. 2. Модели взаимодействия грунта с трубопроводом. Интернет журнал “НАУКОВЕДЕНИЕ”. 2017; 9(1). Адрес доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/99TVN117.pdf>.
- [17] **Ильюшин А.А., Рашидов Т.** О действии сейсмической волны на подземный трубопровод. Известия Академии наук Узбекской ССР. 1971; (1):37–42. Адрес доступа: <https://scienceweb.uz/publication/8900>.
- [18] **Israilov M.Sh., Takhirov Sh.M.** Dynamics of an underground pipeline with slipping contact at soil-pipeline interface under seismic excitation: analytical and numerical investigation of coupled problems. 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering Methods. 2017: 1231–1239. DOI:10.7712/120117.5488.18510.
- [19] **Мирзаев И.М., Никифоровский В.С.** Исследование распространения плоских волн и разрушения в упругих и неидеально упругих составных конструкциях. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1973; (2):58–62.
- [20] **Hasbullah N., Bagus Eko P., Andhika S.** Strength and deformation characteristics of reconstituted sand under different stress paths in true triaxial tests. Journal of Engineering and Technological Sciences. 2020; 52(6):906–929. DOI:10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.6.10.

- [21] **Полянин А.Д.** Нелинейные уравнения типа Клейна–Гордона с переменными коэффициентами: точные решения в неявной форме. Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2019. Адрес доступа: <https://www.researchgate.net/publication/332530518>.
- [22] **Рыскин Н.М., Трубецков Д.И.** Нелинейные волны: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по физич. спец. М.: Наука. Физматлит; 2000: 268. Адрес доступа: <https://rusist.info/book/108841?ysclid=lfyzgoc1721692224>.
- [23] **Kosimov E., Mirzaev I., Bekmirzaev D.** Comparison of the impacts of harmonic and seismic waves on an underground pipeline during the Gazli earthquake. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021; 1030(012082). DOI:10.1088/1757-899X/1030/1/012082.
- [24] **Бекмирзаев Д.А., Мирзаев И.** Оценка сейсмостойкости подземных трубопроводов сложной конфигурации на основе записей реальных землетрясений. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2020; (6):26–31.

Вычислительные технологии, 2023, том 28, № 3, с. 10–24. © ФИЦ ИВТ, 2023
Computational Technologies, 2023, vol. 28, no. 3, pp. 10–24. © FRC ICT, 2023

ISSN 1560-7534
eISSN 2313-691X

MATHEMATICAL MODELLING

DOI:10.25743/ICT.2023.28.3.002

Unsteady waves in an extended underground pipeline under seismic action

MIRZAEV IBRAKHIM*, SHOMURODOV JAKHONGIR F.

Tashkent state transport university, 100067, Tashkent, Uzbekistan

Corresponding author: Mirzaev Ibrakhim, e-mail: ibrakhim.mir@mail.ru

Received April 03, 2023, revised April 07, 2023, accepted April 18, 2023.

Abstract

The research addresses an extended underground pipeline subjected to a seismic wave propagating along its axis. Problems of action of long waves on an extended underground pipeline for linear and nonlinear interaction of the pipeline with the ground are considered. In case of nonlinear interaction dynamic processes are described by nonlinear Klein – Gordon wave equation. The problem of encounter for seismic wave of various forms with an extended underground pipeline has been solved using the finite difference method. Problems with non-linear interaction of pipeline and ground are solved and the obtained results are analyzed. From the analytical solution of a stationary problem for an infinite pipeline under sinusoidal action, it is known that if the wave propagation velocity in the soil is greater than the wave propagation velocity in the pipeline, so the maximum deformation is twice the maximum deformation in the soil. On the basis of numerical solution of non-stationary problem for a finite pipeline it is found that only the discontinuity at the front of deformation wave in the ground leads to this phenomenon. If there are no these discontinuities, then as the strain rate in the ground decreases, the maximum strain in the pipeline beyond the wave front decreases and tends to the maximum ground strain. Conducted researches of one-dimensional problem of seismic wave action on extended underground pipeline justify applicability of implicit difference schemes with practically necessary time step to solve seismodynamic problems of spatially spaced underground pipeline systems.

Keywords: difference diagram, wave, ground, pipeline, elasticity, ductility, fracture, dry friction.

Citation: Mirzaev I., Shomurodov J.F. Unsteady waves in an extended underground pipeline under seismic action. Computational Technologies. 2023; 28(3):10–24. DOI:10.25743/ICT.2023.28.3.002. (In Russ.)

References

1. **Psyras N.K., Sextos A.G.** Safety of buried steel natural gas pipelines under earthquake-induced ground shaking: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018; (106):254–277. DOI:10.1016/j.soildyn.2017.12.020.
2. **Tsinidis G., Di Sarno L., Sextos A., Furtner P.** A critical review on the vulnerability assessment of natural gas pipelines subjected to seismic wave propagation. Part 1: Fragility relations and implemented seismic intensity measures. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019; (86):279–296. DOI:10.1016/j.tust.2019.01.025.
3. **Halkijević I., Vouk D., Posavčić H., Mostečak H.** Damage assessment of water supply networks due to seismic events using vulnerability functions [Procjena oštećenja na vodoopskrbnim mrežama uslijed seizmičkih događaja primjenom funkcija ranjivosti]. *Gradjevinar*. 2021; 73(7):737–749. DOI:10.14256/JCE.3185.2021.
4. **Xu R., Jiang R., Qu T.J.** Review of dynamic response of buried pipelines. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2021; 12(2):art. no. 03120003. DOI:10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000527.
5. **Yousife D.F., Aldefae A.H., Zubaidi S.L., Humaish W.H., Sinichenko E.K.** Static and seismic performance of buried pipelines: a review. *E3S Web of Conferences*. 2021; 318(01011). DOI:10.1051/e3sconf/202131801011.
6. **O'Rourke M.J., Liu X.** Response of buried pipelines subject to earthquake effect. *The Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Monograph Series*. 1999; 276. Available at: <https://ubir.buffalo.edu/xmlui/bitstream/handle/10477/588/99-MN03.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
7. **Sultanov K.S.** Volnovaya teoriya seysmostoykosti podzemnykh sooruzheniy [Wave theory of seismic stability of underground structures]. Tashkent: Izdatel'stvo Fan; 2016: 392. Available at: <https://www.eruditor.io/file/2097102/?ysclid=lg4thbv6ry829718395>. (In Russ.)
8. **Massarsch K.R.** Massarsch K.R. Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests. Keynote Lecture, International Conference on Site Characterization, ISC'2, 19–22 Sept. 2004; Porto, 14. Available at: <https://scienceweb.uz/publication/8919>.
9. **Sultanov K., Vatin N.** Wave theory of seismic resistance of underground pipelines. *Applied Sciences*. 2021; 11(1797). DOI:10.3390/app11041797.
10. **Mirzaev I., Shomurodov J.F.** Wave processes in an extended underground pipeline interacting with soil according to the model of an “ideal elastoplastic body”. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1902. DOI:10.1088/1742-6596/1902/1/012017.
11. **Mirzaev I., Shomurodov J.F.** Seismodynamics of an extended underground pipeline based on a nonlinear model of interaction with the ground. *AIP Conference Proceedings*. 2022; 2637(030004). DOI:10.1063/5.0118457.
12. **Revuzhenko A.F., Stazhevskii S.B., Shemyakin E.I.** On mechanism of deformation of a granular material under high shear. *Soviet Mining Science*. 1974; (10):374–377. DOI:10.1007/BF02509483.
13. **Revuzhenko A.F.** *Mechanics of granular media*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 2006: 317. Available at: <https://link.springer.com/book/9783540338710>.
14. **Rashidov T.** Dinamicheskaya teoriya seysmostoykosti slozhnykh sistem podzemnykh sooruzheniy [Dynamic theory of seismic stability of complex systems of underground structures]. Tashkent: Izdatel'stvo Fan; 1973: 180. Available at: <https://www.twirpx.com/file/1141461/?ysclid=1fw47x5ypv135498746>. (In Russ.)
15. **Israilov M.Sh.** Action of an oblique seismic wave on an underground pipeline. *Mechanics of Solids*. 2022; (57):1006–1015. DOI:10.3103/s0025654422050089.
16. **Bashirzade S.R., Ovchinnikov I.G.** Forecasting the behavior of pipeline structures in complex soil and geological conditions. Pt 2. Models of soil-pipeline interaction. *Internet Journal “NAUKOVEDENIYE”*. 2017; 9(1). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/99TVN117.pdf>. (In Russ.)

17. **Ilyushin A.A., Rashidov T.** On the action of seismic waves on an underground pipeline. *Izvestiya Akademii nauk Uzbekskoy SSR*. 1971; (1):37–42. Available at: <https://scienceweb.uz/publication/8900> (In Russ.)
18. **Israilov M.Sh., Takhirov Sh.M.** Dynamics of an underground pipeline with slipping contact at soil-pipeline interface under seismic excitation: analytical and numerical investigation of coupled problems. 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering Methods. 2017: 1231–1239. DOI:10.7712/120117.5488.18510.
19. **Mirzaev I.M., Nikiforovskii V.S.** Plane wave propagation and fracture in elastic and imperfectly elastic jointed structures. *Soviet Mining Science*. 1973; (9):161–165. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02506181>.
20. **Hasbullah N., Bagus Eko P., Andhika S.** Strength and deformation characteristics of reconstituted sand under different stress paths in true triaxial tests. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2020; 52(6):906–929. DOI:10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.6.10.
21. **Polyanin A.D.** Nonlinear Klein–Gordon type equations with variable coefficients: Exact solutions in an implicit form. *Vestnik Natsionalnogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta MIFI*. 2019. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/332530518> (In Russ.)
22. **Ryskin N.M., Trubetskov D.I.** *Nelineynye volny [Nonlinear waves]*. Moscow: Nauka. Fizmatlit; 2000: 268. Available at: <https://rusist.info/book/108841?ysclid=1fyzgoc1721692224>. (In Russ.)
23. **Kosimov E., Mirzaev I., Bekmirzaev D.** Comparison of the impacts of harmonic and seismic waves on an underground pipeline during the Gazli earthquake. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(012082). DOI:10.1088/1757-899X/1030/1/012082.
24. **Bekmirzaev D.A., Mirzaev I.** Earthquake resistance assessment of buried pipelines of complex configuration based on records of real earthquakes. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021; 57(6):491–496. DOI:10.1007/s11204-021-09697-0.