

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНОГО НЕФТЕПРОВОДА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Мусаев В.К.

*Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II,
Москва, e-mail: musayev-vk@yandex.ru*

Рассмотрена некоторая информация моделирования безопасности подземного нефтепровода при нестационарных сейсмических воздействиях. Для решения поставленных задач применяются волновые уравнения теории упругости. Поставленная задача реализуется с помощью численного моделирования уравнений волновой теории упругости. В данном случае применяется волновая теория сейсмической безопасности. Задача решается методом сквозного счета, без выделения разрывов. Применяется однородный алгоритм. С помощью метода конечных элементов в перемещениях, линейную задачу с начальными и граничными условиями привели к линейной задаче Коши. Рассмотрена постановка четырех задач при различных углах подхода сейсмического воздействия на подземный нефтепровод. Сейсмическое воздействие моделируется в виде функции Хевисайда. Решается система уравнений из 32543720 неизвестных.

Ключевые слова: численный метод, алгоритм Мусаева В.К., комплекс программ, нестационарные упругие волны, динамика сплошных сред, физические и механические эффекты, краевая задача, волновая теория сейсмической безопасности, сейсмика, сейсмическая стойкость, сейсмическое воздействие, сейсмическая нагрузка, фундаментальное воздействие, полуплоскость, неотражающие граничные условия, исследуемая расчетная область, нефтепровод, подземное сооружение, импульс в виде ступеньки, функция Хевисайда

COMPUTER MODELING OF THE SAFETY OF THE UNDERGROUND OIL PIPELINE NON-STATIONARY SEISMIC LOADING

Musayev V.K.

Moscow state transport University of Emperor Nicholas II, Moscow, e-mail: musayev-vk@yandex.ru

Reviewed certain information modeling safety of underground pipeline under nonstationary seismic impacts. For the decision of tasks in view are applied to the wave equation of elasticity theory. The task is implemented using numerical simulation of wave equations of elasticity theory. In this case, the wave theory of seismic safety. The problem is solved by the method of end-to-end account, without allocation of breaks. Applies a uniform algorithm. Using the method of finite elements in displacements, a linear problem with initial and boundary conditions led to a linear Cauchy problem. Considered setting four objectives at various angles of approach of seismic impact on underground pipeline. The seismic excitation is modeled as a function of Heaviside. Solve the system of equations of 32543720 unknown.

Keywords: numerical method, algorithm Musayev V.K., the programme complex, unsteady elastic waves, dynamics of continuous media, physical and mechanical effects, boundary value problem, wave theory for seismic safety, seismic, seismic resistance, seismic effect, seismic load, fundamental impact, half-plane, non-reflective boundary conditions, the investigated design region, pipeline, underground construction, momentum in the form of a step, function of Heaviside

Рассматриваются вопросы численного моделирования сейсмического воздействия на подземный нефтепровод с основанием в виде полуплоскости. Поставленная задача решается с помощью численного моделирования уравнений нестационарной математической теории упругости.

В работах [1–10] приведена информация о моделировании нестационарных волн напряжений в деформируемых телах сложной формы с помощью применяемого численного метода, алгоритма и комплекса программ.

О постановке динамической задачи теории упругости

Волны напряжений различной природы, распространяясь, в деформируемом теле взаимодействуют, друг с другом, что при-

водит к образованию новых областей возмущений, перераспределению напряжений и деформаций. При интерференции волн напряжений их интенсивности складываются. Они могут достигать значений, превосходящих предел прочности материала. В этом случае наступает разрушение материала. После трехкратного или четырехкратного прохождения и отражения волн напряжений в теле процесс распространения возмущений становится установившимся, напряжения и деформации усредняются, тело находится в колебательном движении.

В работах [1, 3, 6–8] приведена информация о физической достоверности и математической точности моделирования нестационарных волн напряжений в деформируемых телах с помощью рассматриваемого

мого численного метода, алгоритма и комплекса программ.

Для решения задачи о моделировании упругих нестационарных волн напряжений в областях сложной формы рассмотрим некоторое тело Γ в прямоугольной декартовой системе координат XOY , которому в начальный момент времени $t = 0$ сообщается механическое нестационарное импульсное воздействие. Предположим, что тело Γ изготовлено из однородного изотропного материала, подчиняющегося упругому закону Гука при малых упругих деформациях.

Точные уравнения двумерной (плоское напряженное состояние) динамической теории упругости имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial Y} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial Y} &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad (x, y) \in \Gamma, \\ \sigma_x &= \rho C_p^2 \varepsilon_x + \rho(C_p^2 - 2C_s^2) \varepsilon_y, \\ \sigma_y &= \rho C_p^2 \varepsilon_y + \rho(C_p^2 - 2C_s^2) \varepsilon_x, \quad \tau_{xy} = \rho C_s^2 \gamma_{xy}, \\ \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial X}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial Y}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial Y} + \frac{\partial v}{\partial X}, \quad (x, y) \in (\Gamma \cup S), \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_x , σ_y и τ_{xy} – компоненты тензора упругих напряжений; ε_x , ε_y и γ_{xy} – компоненты тензора упругих деформаций; u и v – составляющие вектора упругих перемещений вдоль осей OX и OY соответственно; ρ – плотность материала;

$C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$ – скорость продольной упругой волны;

$C_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$ – скорость поперечной упругой волны;

ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; $S (S_1 \cup S_2)$ – граничный контур тела Γ .

Систему (1) в области, занимаемой телом Γ , следует интегрировать при начальных и граничных условиях.

Разработка методики и алгоритма

Для решения двумерной плоской динамической задачи теории упругости с начальными и граничными условиями (1) используем метод конечных элементов в перемещениях. Задача решается методом сквозного счета, без выделения разрывов.

Принимая во внимание определение матрицы жесткости, вектора инерции и векто-

ра внешних сил для тела Γ , записываем приближенное значение уравнения движения в теории упругости

$$\bar{H} \ddot{\bar{\Phi}} + \bar{K} \bar{\Phi} = \bar{R}, \quad \bar{\Phi}|_{t=0} = \bar{\Phi}_0, \quad \dot{\bar{\Phi}}|_{t=0} = \dot{\bar{\Phi}}_0, \quad (2)$$

где \bar{H} – диагональная матрица инерции; \bar{K} – матрица жесткости; $\bar{\Phi}$ – вектор узловых упругих перемещений; $\dot{\bar{\Phi}}$ – вектор узловых упругих скоростей перемещений; $\ddot{\bar{\Phi}}$ – вектор узловых упругих ускорений; \bar{R} – вектор внешних узловых упругих сил.

Соотношение (2) система линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка в перемещениях с начальными условиями. Таким образом, с помощью метода конечных элементов в перемещениях, линейную задачу с начальными и граничными условиями (1) привели к линейной задаче Коши (2).

Для интегрирования уравнения (2) конечноэлементным вариантом метода Галеркина приведем его к следующему виду

$$\bar{H} \frac{d}{dt} \dot{\bar{\Phi}} + \bar{K} \bar{\Phi} = \bar{R}, \quad \frac{d}{dt} \bar{\Phi} = \dot{\bar{\Phi}}. \quad (3)$$

Интегрируя по временной координате соотношение (3) с помощью конечноэлементного варианта метода Галеркина, получим двумерную явную двухслойную конечноэлементную линейную схему в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\Phi}}_{i+1} &= \dot{\bar{\Phi}}_i + \Delta t \bar{H}^{-1} (-\bar{K} \bar{\Phi}_i + \bar{R}_i), \\ \bar{\Phi}_{i+1} &= \bar{\Phi}_i + \Delta t \dot{\bar{\Phi}}_{i+1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Основные соотношения метода конечных элементов в перемещениях получены с помощью принципа возможных перемещений и конечноэлементного варианта метода Галеркина.

Общая теория численных уравнений математической физики требует для этого наложение определенных условий на отношение шагов по временной координате Δt и по пространственным координатам, а именно

$$\Delta t = 0,5 \frac{\min \Delta l_i}{C_p} \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (5)$$

где Δl – длина стороны конечного элемента.

О моделировании воздействия сейсмической волны на подземный нефтепровод

В работе приводится постановка для четырех задач. Расчеты проводились при следующих единицах измерения: килограмм-сила (кгс); сантиметр (см); секунда (с).

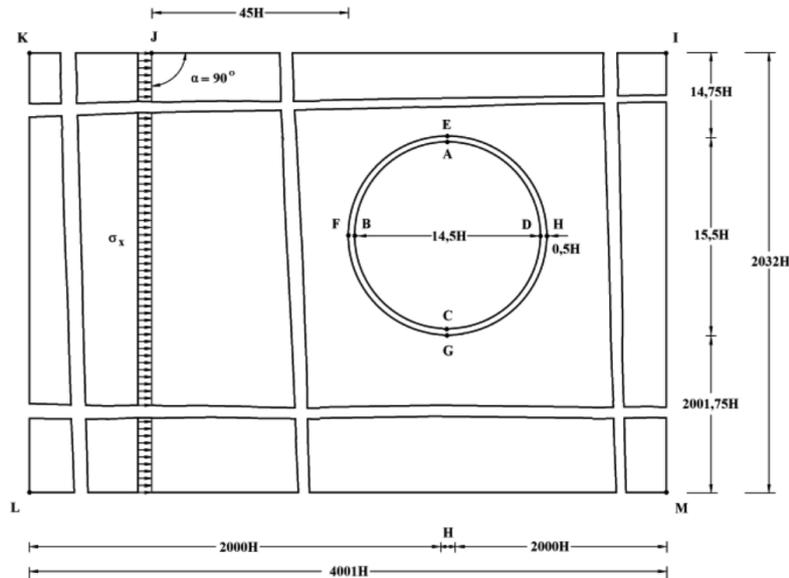


Рис. 1. Постановка задачи о воздействии плоской продольной сейсмической волны под углом девяносто градусов к горизонту на подземный нефтепровод

Для рассматриваемых материалов были приняты следующие исходные данные. Для трубы приняты следующие исходные данные: $H = \Delta x = \Delta y$; $\Delta t = 9,309 \times 10^{-7}$ с; $E = 2,1 \times 10^6$ кгс/см²; $\nu = 0,3$; $\rho = 0,8 \times 10^{-5}$ кгс с²/см⁴; $C_p = 5371$ м/с; $C_s = 3177$ м/с. Для основания приняты следующие исходные данные: $H = \Delta x = \Delta y$; $\Delta t = 2,788 \times 10^{-6}$ с; $E = 3,15 \times 10^5$ кгс/см²; $\nu = 0,2$; $\rho = 0,255 \times 10^{-5}$ кгс с²/см⁴; $C_p = 3587$ м/с; $C_s = 2269$ м/с. Внутренний диаметр трубы равен $14,5H$. Средний диаметр трубы равен $15,5H$. Наружный диаметр трубы равен $15,5H$. Толщина трубы равна $0,5H$. Решается система уравнений из 32543720 неизвестных.

1. Рассмотрим задачу о воздействии плоской продольной сейсмической волны (рис. 2) под углом девяносто градусов к горизонту на подземный нефтепровод (рис. 1). От точки J под углом девяносто градусов на расстоянии трех средних диаметров от края трубы приложено нормальное напряжение σ_x , которое при $0 \leq n \leq 25$ ($n = t/\Delta t$) изменяется линейно от 0 до P, а при $n \geq 25$ равно P ($P = \sigma_0$, $\sigma_0 = 1$ кгс/см²). Граничные условия для контура KLMИ при $t > 0$ $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$. Отраженные волны от контура KLMИ не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n \leq 3000$. Контур KJI свободен от напряжений, кроме точки J. Внутренний контур трубы ABCD свободен от напряжений. На внешней границе контура трубы EFGH и среды приняты условия непрерывности перемещений.

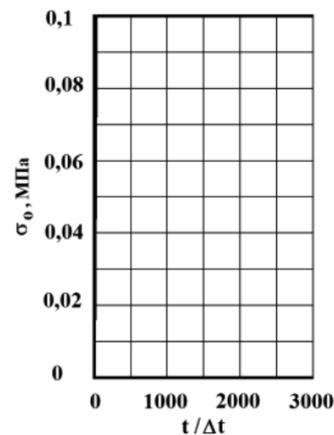


Рис. 2. Сейсмическое воздействие в виде ступенчатой функции (функция Хевисайда)

2. Рассмотрим задачу о воздействии плоской продольной сейсмической волны (рис. 2) под углом восемьдесят градусов к горизонту на подземный нефтепровод (рис. 3). От точки J под углом восемьдесят градусов на расстоянии трех средних диаметров от края трубы приложено нормальное напряжение σ_n , которое при $0 \leq n \leq 25$ ($n = t/\Delta t$) изменяется линейно от 0 до P, а при $n \geq 25$ равно P ($P = \sigma_0$, $\sigma_0 = 1$ кгс/см²). Граничные условия для контура KLMИ при $t > 0$ $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$. Отраженные волны от контура KLMИ не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n \leq 3000$. Контур KJI свободен от напряжений, кроме точки J. Внутренний контур трубы ABCD свободен от напряже-

ний. На внешней границе контура трубы EFGH и среды приняты условия непрерывности перемещений.

От точки J под углом семьдесят градусов на расстоянии трех средних диаметров от края трубы приложено нормальное напряжение σ_n , которое при $0 \leq n \leq 25$ ($n = t/\Delta t$) изменяется линейно от 0 до P, а при $n \geq 25$ равно P ($P = \sigma_0, \sigma_0 = 1 \text{ кгс/см}^2$). Граничные условия

для контура KLMИ при $t > 0$ $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$. Отраженные волны от контура KLMИ не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n \leq 3000$. Контур KИ свободен от напряжений, кроме точки J. Внутренний контур трубы ABCD свободен от напряжений. На внешней границе контура трубы EFGH и среды приняты условия непрерывности перемещений.

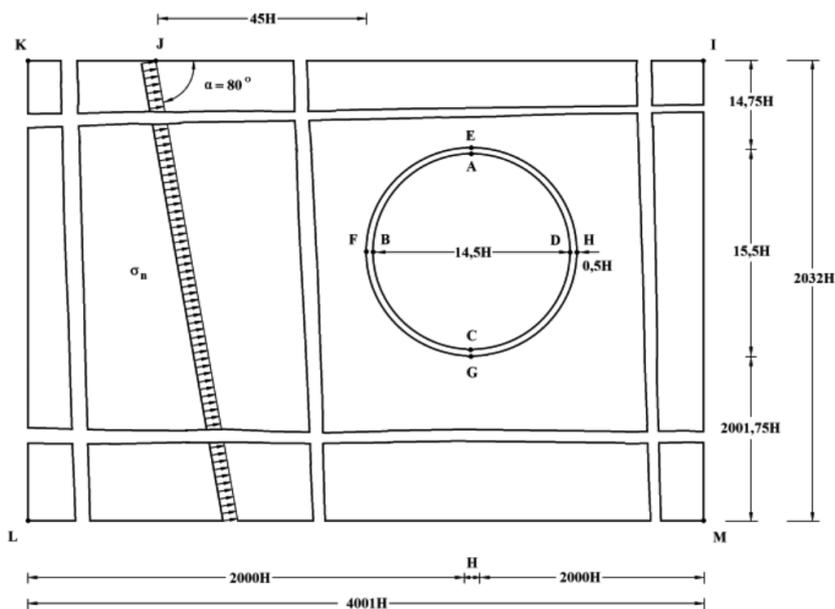


Рис. 3. Постановка задачи о воздействии плоской продольной сейсмической волны под углом восемьдесят градусов к горизонту на подземный нефтепровод

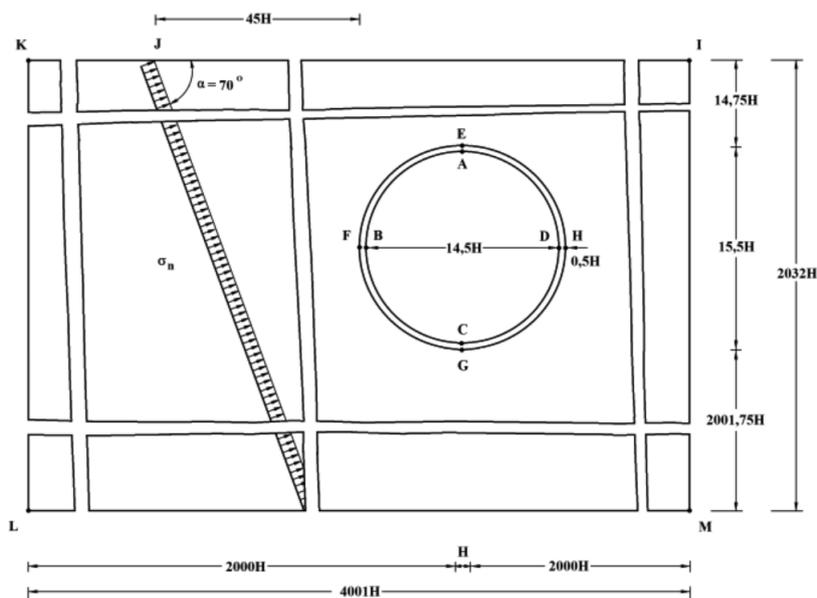


Рис. 4. Постановка задачи о воздействии плоской продольной сейсмической волны под углом семьдесят градусов к горизонту на подземный нефтепровод

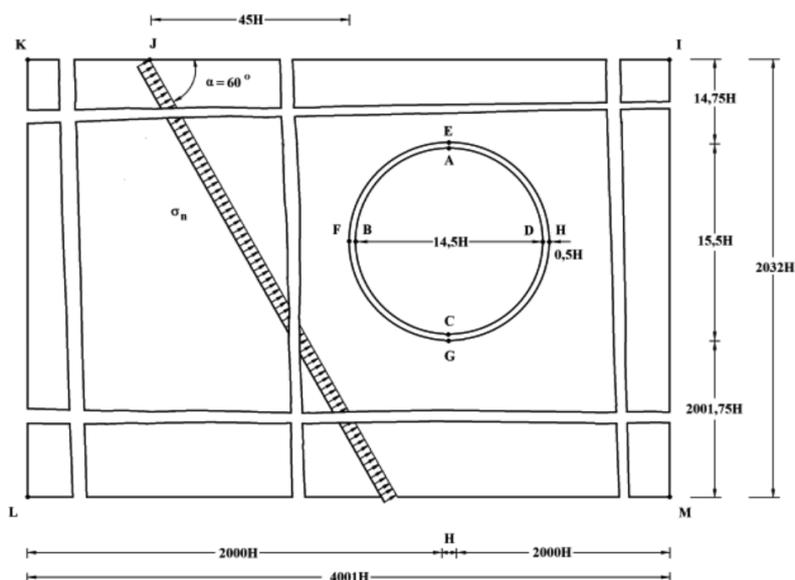


Рис. 5. Постановка задачи о воздействии плоской продольной сейсмической волны под углом шестьдесят градусов к горизонту на подземный нефтепровод

3. Рассмотрим задачу о воздействии плоской продольной сейсмической волны (рис. 2) под углом семьдесят градусов к горизонту на подземный нефтепровод (рис. 4).

4. Рассмотрим задачу о воздействии плоской продольной сейсмической волны (рис. 2) под углом шестьдесят градусов к горизонту на подземный нефтепровод (рис. 5). От точки J под углом шестьдесят градусов на расстоянии трех средних диаметров от края трубы приложено нормальное напряжение σ_n , которое при $0 \leq n \leq 25$ ($n = t/\Delta t$) изменяется линейно от 0 до P, а при $n \geq 25$ равно P ($P = \sigma_0$, $\sigma_0 = 1$ кгс/см²). Граничные условия для контура KLMJ при $t > 0$ $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$. Отраженные волны от контура KLMJ не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n \leq 3000$. Контур KJ свободен от напряжений, кроме точки J. Внутренний контур трубы ABCD свободен от напряжений. На внешней границе контура трубы EFGH и среды приняты условия непрерывности перемещений.

Список литературы

1. Мусаев В.К. О достоверности компьютерного моделирования нестационарных упругих волн напряжений в деформируемых телах сложной формы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 11. – С. 10–14.
2. Мусаев В.К. Моделирование нестационарных упругих волн напряжений в деформируемых областях с помощью метода конечных элементов в перемещениях // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 12 (1). – С. 28–32.
3. Мусаев В.К. Оценка точности и достоверности численного моделирования при решении задач об отражении и интерференции нестационарных упругих

волн напряжений // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 1 (часть 7). – С. 1184–1187.

4. Мусаев В.К. Математическое моделирование поверхностных волн напряжений в задаче Лэмба при воздействии в виде дельта функции // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 2 (часть 1). – С. 25–29.

5. Мусаев В.К. Математическое моделирование поверхностных волн напряжений в задаче Лэмба при воздействии в виде функции Хевисайда // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 5 (часть 1). – С. 38–41.

6. Мусаев В.К. Исследования устойчивости явной двухслойной линейной конечноэлементной схемы для внутренних узловых точек на равномерной прямоугольной сетке // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 5. – С. 39–42.

7. Мусаев В.К. Моделирование нестационарных стоячих упругих волн в бесконечной полосе при воздействии в виде треугольного импульса // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 11 (часть 2). – С. 248–251.

8. Мусаев В.К. Численное моделирование плоских продольных волн в виде импульсного воздействия (восходящая часть – четверть круга, средняя – горизонтальная, нисходящая – линейная) в упругой полуплоскости // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 11 (часть 2). – С. 222–226.

9. Мусаев В.К. Моделирование нестационарных упругих волн напряжений в Курпсайской плотине с основанием (полуплоскость) с помощью волновой теории сейсмической безопасности // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 3–1. – С. 47–50.

10. Мусаев В.К. Моделирование нестационарных упругих динамических напряжений в полуплоскости без полости и с полостью с помощью волновой теории сейсмической безопасности // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 3–2. – С. 227–231.