

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕООБЪЕКТАХ С ПОМОЩЬЮ ВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Мусаев В.К.*МГМУ, Москва, e-mail: musayev-vk@yandex.ru*

Приводится информация о моделировании нестационарных волн напряжений в деформируемых областях с помощью метода конечных элементов в перемещениях. Задачи решаются методом сквозного счета, без выделения разрывов. То есть применяется однородный алгоритм. За основные неизвестные в узле конечного элемента приняты два упругих перемещения и две скорости упругих перемещений. Основные соотношения метода конечных элементов в перемещениях по пространственным координатам получены с помощью принципа возможных перемещений, то есть с помощью метода динамического равновесия внутренних и внешних сил. Для аппроксимации по пространственным координатам применяются треугольные конечные элементы с линейной аппроксимацией упругих перемещений и прямоугольные конечные элементы с четырьмя узловыми точками с билинейной аппроксимацией упругих перемещений. Для аппроксимации по временной координате применяются линейные конечные элементы с двумя узловыми точками с линейной аппроксимацией перемещений. При разработке комплекса программ использовался алгоритмический язык Фортран-90. Применяется квазирегулярный подход при аппроксимации исследуемой области. Рассмотрены следующие задачи. Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на здание с фундаментом и основанием в Джамбуле. Рассматривается задача о воздействии ускорения землетрясения на здание многослойным основанием в Улан-Удэ. Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на сооружение с фундаментом и основанием (дымовая труба Шымкентского нефтеперерабатывающего завода). Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на подводное подземное подкрепленное круглое отверстие. Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на сооружение с фундаментом и основанием (дымовая труба Шымкентского свинцового завода).

Ключевые слова: динамика сплошных сред, распространение волн, волновая теория, полуплоскость, алгоритмический язык Фортран-90, численный метод, алгоритм, комплекс программ, конечные элементы первого порядка, условия на фронте плоской волны, импульсное воздействие, функция Хевисайда, волновая теория сейсмической безопасности, напряжения на фронте плоской волны, здание, сооружение, дымовая труба, подкрепленное отверстие, подводное и подземное сооружение, многослойное основание

MODELING NONSTATIONARY PROCESSES IN THE GEOOBJECTS WITH THE HELP OF WAVE THEORY FOR SEISMIC SAFETY

Musayev V.K.*MSMU, Moscow, e-mail: musayev-vk@yandex.ru*

Provides information on the modeling of non-stationary of stress waves in deformable fields using the finite element method in displacements. Problems are solved by the method of end-to-end account, without allocation of breaks. That is, apply the homogeneous algorithm. For the main unknown node finite element has two elastic movement and two speeds of elastic displacements. The basic relations of the finite element method in displacements in spatial coordinates is obtained using the principle of possible displacements, i.e. using the method of dynamic balance of internal and external forces. For approximation of spatial coordinates used triangular finite elements with linear approximation of elastic displacements and rectangular finite elements with four nodal points with bilinear approximation of elastic displacements. For approximation on the time coordinate used linear finite elements with two nodal points with linear approximation of displacements. When developing complex programs used algorithmic language Fortran-90. Quasi-regular used approach in approximating the study area. The following tasks. The problem about the effects of plane longitudinal elastic waves on a building with a Foundation and base in the villages. Consider the problem of the acceleration of earthquake the building of the multi-layer base in Ulan-Ude. The problem about the effects of plane longitudinal elastic waves on the construction of the Foundation and the base (the chimney Shymkent refinery). The problem about the effects of plane longitudinal elastic waves on underwater underground reinforced round hole. The problem about the effects of plane longitudinal elastic waves on the construction of the Foundation and the base (the chimney Shymkent lead plant).

Keywords: dynamics of continuous media, wave propagation, wave theory, the half-plane, algorithmic language Fortran-90, numerical method, algorithm, software complex, finite elements first order conditions at the front of the plane wave, pulse impact, the function of Heaviside, wave theory for seismic safety, the voltage on the front of a plane wave, building, structure, chimney, reinforced hole, underwater and underground construction, laminated base

В настоящее время активно применяются численные методы для решения различных задач нестационарной механики деформируемого твердого тела.

Рассматриваемые физические процессы решаются с помощью методов математического моделирования, который в настоящее время является

одним из мощных инструментов исследования.

Некоторые результаты в области практической реализации разработанного метода, алгоритма и комплекса программ при решении нестационарных динамических воздействий на сооружения с окружающей средой приведены в следующих работах [1–10].

Оценка точности и достоверности разработанного метода, алгоритма и комплекса программ приведена в следующих работах [1–7, 9–10].

Для решения краевой задачи используется метод конечных элементов в перемещениях. Задачи решаются методом сквозного счета, без выделения разрывов (однородный алгоритм).

Рассмотрим некоторые результаты в области постановки практических задач. Расчеты проводились при следующих единицах измерения: килограмм-сила (кгс); сантиметр (см); секунда (с). Для перехода в другие единицы измерения были приняты следующие допущения: $1 \text{ кгс/см}^2 \approx 0,1 \text{ МПа}$; $1 \text{ кгс с}^2/\text{см}^4 \approx 10^9 \text{ кг/м}^3$.

1. Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на систему сооружение с фундаментом и основанием (пятиэтажное здание в г. Джамбуле). Начальные условия приняты нулевыми. В сечении на расстоянии $2H$ ($H = 15,5 \text{ м}$) (рис. 1) при $0 \leq n_1 \leq 10$ скорости упругих перемещений $\dot{u}_2$ и $\dot{v}_2$ изменяются линейно от 0 до $\dot{u}_2 = P_2 \sin \alpha$ и $\dot{v}_2 = P_2 \cos \alpha$ ($P_2 = \sigma_0 / (\rho_2 C_{p2})$, $\sigma_0 = 0,1 \text{ МПа}$ (1 кгс/см^2)), а при $n_1 > 10$ $\dot{u}_2 = P_2 \sin \alpha$ и $\dot{v}_2 = P_2 \cos \alpha$. Граничные условия для контура НИЖК при $t > 0$ $u_2 = v_2 = \dot{u}_2 = \dot{v}_2 = 0$. Отраженные волны от контура НИЖК не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n_1 \leq 8000$. На границах материалов с разными физическими свойствами приняты условия непрерывности перемещений (1 – ABCDEF; 2 – СНИКФЕД). Исследуемая расчетная область имеет 572 узловые точки.

Граничные условия для контура НИЖК при $t > 0$ $u_2 = v_2 = \dot{u}_2 = \dot{v}_2 = 0$. Отраженные волны от контура НИЖК не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n_1 \leq 8000$.

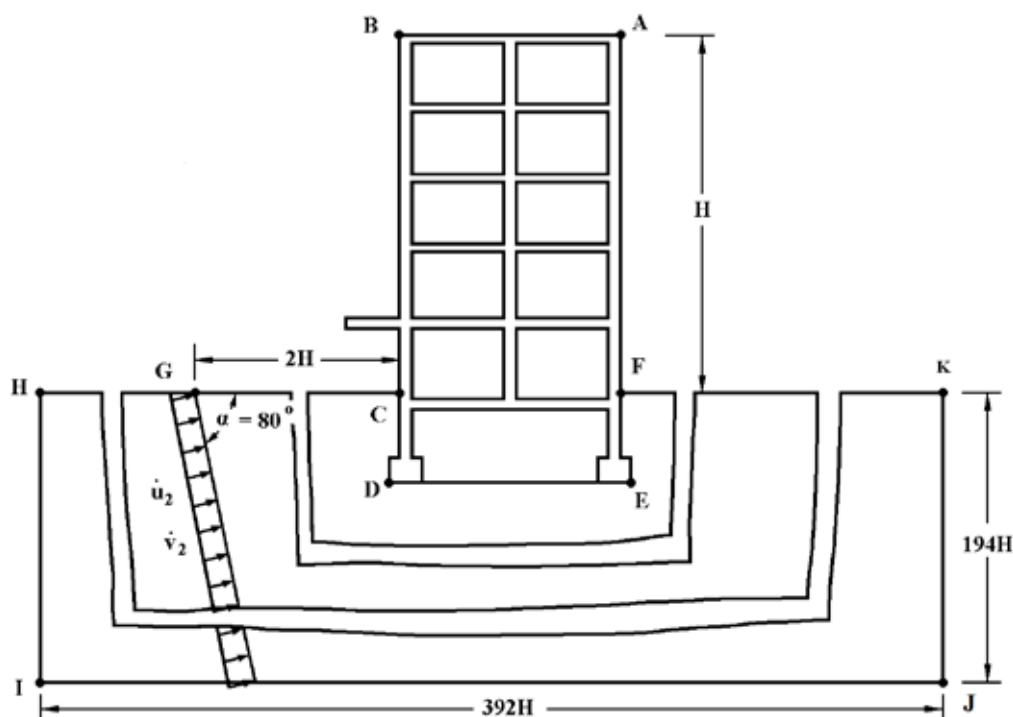


Рис. 1. Постановка задачи для пятиэтажного здания в городе Джамбуле

2. Рассматривается задача о воздействии ускорения землетрясения Эль-Центро $\ddot{\psi}$ при $t = 0,98-2,98$ с на систему сооружение с фундаментом и основанием (девяти- и десятиэтажное здание в г. Улан-Удэ). Начальные условия приняты нулевыми. В сечении на расстоянии $1,63H$ ($H=31,5$ м) для десятиэтажного здания и $1,5H$ ($H=34,3$ м) (рис. 2) для десятиэтажного здания приложена скорость перемещений $\dot{\psi}$ ($\dot{u} = \dot{\psi} \sin \alpha$; $\dot{v} = \dot{\psi} \cos \alpha$; $i = 2, 3, 4, \dots, 9$). Граничные условия для контура $A_7 - A_{24}$ при $t > 0$ $u_i = v_i = \dot{u}_i = \dot{v}_i = 0$. Отраженные волны от контура $A_7 - A_{24}$ не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n_1 \leq 8000$. На границах материалов с разными физическими свойствами приняты условия непрерывности перемещений (1 - ABCDEF; 2 - CA₈DA₁₆FEA₁₇; 3 - A₁₇A₈A₉A₁₈; 4 - A₁₈A₉A₁₀A₁₉; 5 - A₁₉A₁₀A₁₁A₂₀; 6 - A₂₀A₁₁A₁₂A₂₁; 7 - A₂₁A₁₂A₁₃A₂₂; 8 - A₂₂A₁₃A₁₄A₂₃; 9 - A₂₃A₁₄A₁₅A₂₄). Исследуемая расчетная область имеет 500 узловых точек.

3. Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на систему сооружение с фундаментом и основанием (дымовая труба Шымкентского нефтеперерабатывающего завода). Начальные условия приняты нулевыми. В сечении на расстоянии $0,76H$ ($H = 120$ м) (рис. 3) при $0 \leq n_1 \leq 10$ скорость упругого перемещения $\dot{u}_2$ изменяется линейно от 0 до P , ($P = \sigma_0 / (\rho_2 C_{p2})$), $\sigma_0 = 0,1$ МПа (1 кгс/см²), а при $n_1 > 10$ $\dot{u}_2 = P$. Начальные условия приняты нулевыми. В сечении на расстоянии $0,76H$ ($H = 120$ м)

(рис. 10) при $0 \leq n_1 \leq 10$ скорость упругого перемещения $\dot{u}_2$ изменяется линейно от 0 до P , ($P = \sigma_0 / (\rho_2 C_{p2})$), $\sigma_0 = 0,1$ МПа (1 кгс/см²), а при $n_1 > 10$ $\dot{u}_2 = P$. Граничные условия для контура $D_{12} - D_{15}$ при $t > 0$ $u_2 = v_2 = \dot{u}_2 = \dot{v}_2 = 0$. Отраженные волны от контура $D_{12} - D_{15}$ не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n_1 \leq 6000$. На границах материалов с разными физическими свойствами приняты условия непрерывности перемещений (1 - D₁-D₁₀; 2 - D₂D₉D₁₂D₁₅). Исследуемая расчетная область имеет 446 узловых точек.

4. Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на подводное подземное подкрепленное круглое отверстие. Начальные условия приняты нулевыми. В сечении на расстоянии $2,55H$ (рис. 4) при $0 \leq n_1 \leq 10$ скорость упругих перемещений $\dot{u}_i$ изменяется от 0 до P_i ($P_i = \sigma_0 / (\rho_i C_{pi})$), $\sigma_0 = -0,1$ МПа (-1 кгс/см²), а при $n_1 > 10$ $\dot{u}_i = P_i$ ($i = 2, 3$). Внутренний контур подкрепленного круглого отверстия $A_1 - A_4$ предполагается свободным от нагрузок при $t > 0$. Граничные условия для контура $A_9 - A_{13}$ при $t > 0$ $u_i = v_i = \dot{u}_i = \dot{v}_i = 0$ ($i = 2, 3$). Отраженные волны от контура $A_9 - A_{13}$ не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n_1 \leq 2000$. На границах материалов с разными физическими свойствами приняты условия непрерывности перемещений (1 - A₉-A₁₁A₁₄ (вода); 2 - A₅-A₈A₁₄A₁₁-A₁₃ (грунт); 3 - A₁-A₈ (подкрепление)). Исследуемая расчетная область имеет 487 узловых точек.

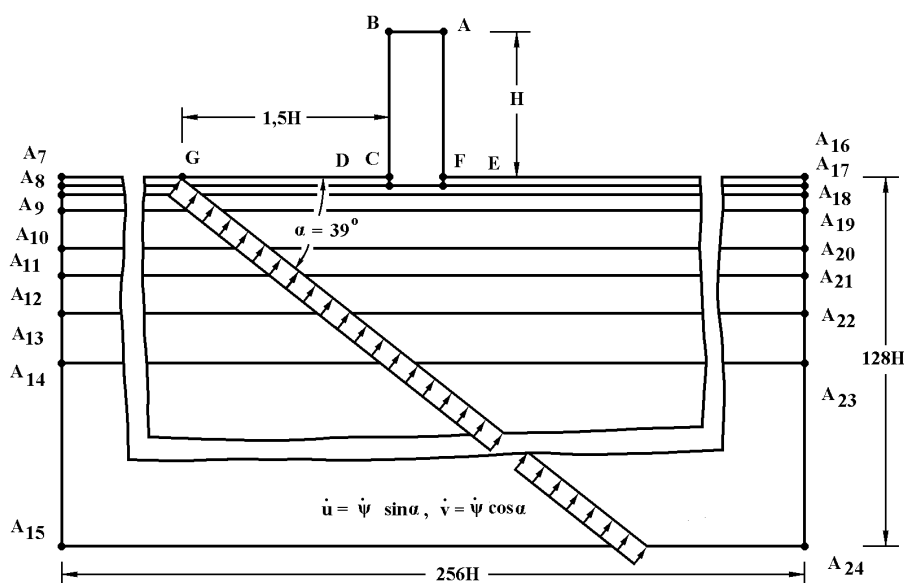


Рис. 2. Постановка задачи для десятиэтажного здания в г. Улан-Удэ

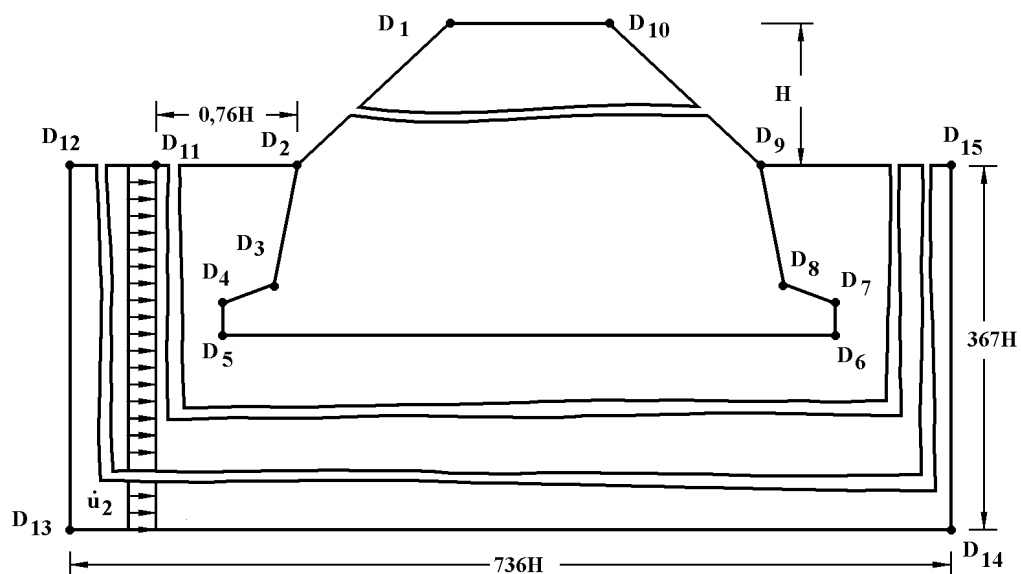


Рис. 3. Постановка задачи для Шымкентского нефтеперерабатывающего завода

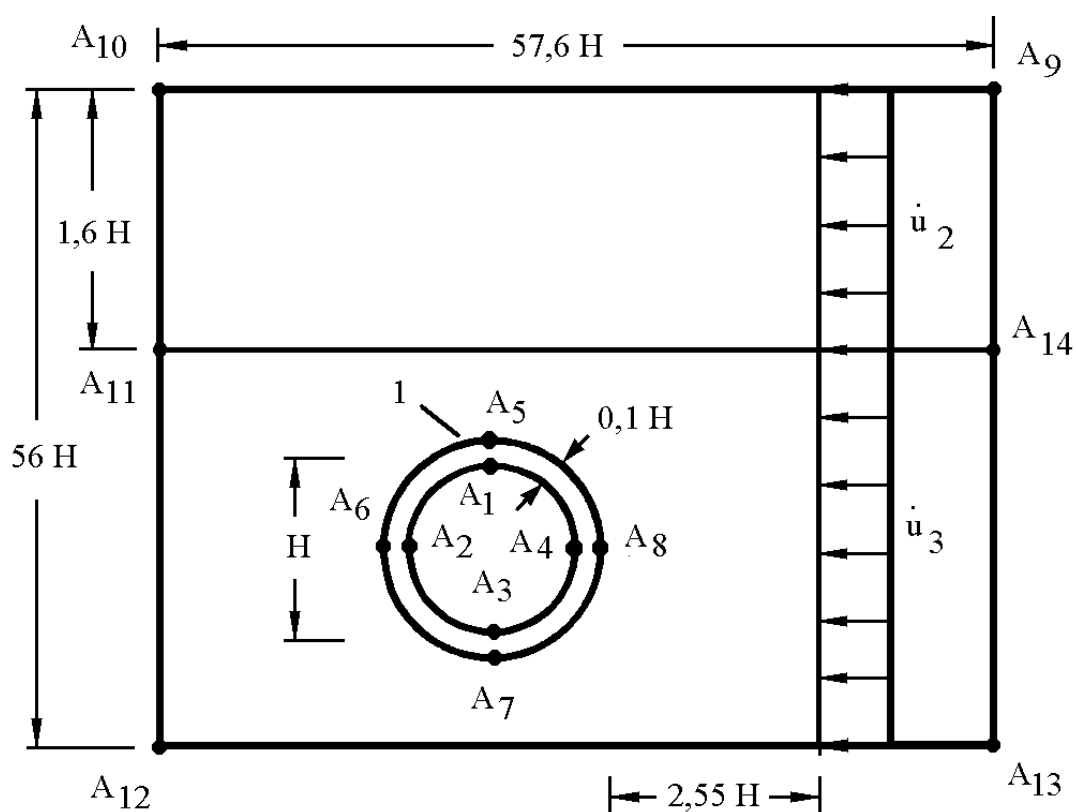


Рис. 4. Постановка задачи о подземном подкрепленном круглом отверстии

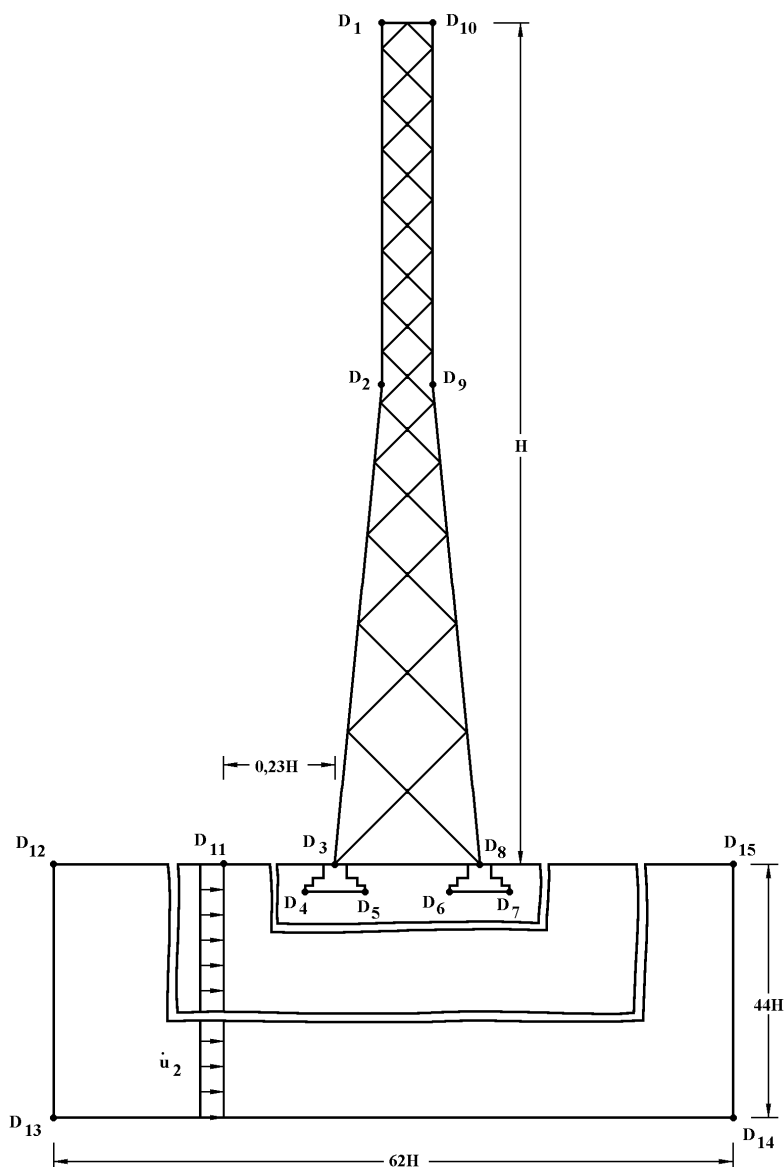


Рис. 5. Постановка задачи для Шымкентского свинцового завода

5. Рассматривается задача о воздействии плоской продольной упругой волны на систему сооружение с фундаментом и основанием (дымовая труба Шымкентского свинцового завода). Начальные условия приняты нулевыми. В сечении на расстоянии $0,23H$ (рис. 5) ($H = 180$ м) при $0 \leq n_1 \leq 10$ скорость упругого перемещения $\dot{u}_2$ изменяется линейно от 0 до $\dot{u}_2 = P$ ($P = \sigma_0 / (\rho_2 C_{p2})$), а при $n_1 > 10$ $\dot{u}_2 = P$ ($\sigma_0 = 0,1$ МПа (1 кгс/см²)). Граничные условия для контура $D_{12} - D_{15}$ при $t > 0$ $u_2 = v_2 = \dot{u}_2 = \dot{v}_2 = 0$. Отраженные волны от контура $D_{12} - D_{15}$ не доходят до исследуемых точек при $0 \leq n_1 \leq 6000$.

На границах материалов с разными физическими свойствами приняты условия непрерывности перемещений ($1 - D_3 - D_5$ и $D_6 - D_8$; $2 - D_{15} - D_8 - D_7 - D_6 - D_3 - D_5 - D_4 - D_{12} - D_{13} - D_{14}$; $3 - D_{10} - D_1 - D_2 - D_3 - D_8 - D_9$). Исследуемая расчетная область имеет 415 узловых точек.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

Рассмотрена постановка задачи о воздействии плоской продольной упругой волны на систему сооружение – фундамент – основание (пятиэтажное здание в г. Джамбуле).

Рассмотрена постановка задачи о воздействии ускорения землетрясения Эль-Центро при $t = 0,98 - 2,98$ с на систему сооружение с фундаментом и основанием (десятиэтажное здание в г. Улан-Удэ).

Рассмотрена постановка задачи о воздействии плоской продольной упругой волны на систему сооружение с фундаментом и основанием (дымовая труба Шымкентского нефтеперерабатывающего завода).

Рассмотрена постановка задачи о воздействии плоской продольной упругой волны на подводное подземное подкрепленное круглое отверстие.

Рассмотрена постановка задачи о воздействии плоской продольной упругой волны на систему сооружение с фундаментом и основанием (дымовая труба Шымкентского свинцового завода).

Методика, алгоритм, комплекс программ и результаты решенных задач рекомендуются для использования в научно-технических организациях, специализирующихся в области динамического расчета сооружений с окружающей средой при ударных, взрывных и сейсмических воздействиях.

Математическое моделирование позволяет учесть инженерные объекты при решении задач о сейсмической безопасности территорий.

Список литературы

1. Мусаев В.К. Решение задачи дифракции и распространения упругих волн методом конечных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – № 4. – С. 74–78.
2. Мусаев В.К. Численное моделирование динамического напряженного состояния сооружений уравнениями двумерной теории упругости и пластичности: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук по специальности 01.02.04. – М.: Совинтервод, 1993. – 46 с.
3. Мусаев В.К. Численное решение волновых задач теории упругости и пластичности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия прикладная математика и информатика. – 1997. – № 1. – С. 87–110.
4. Мусаев В.К. Об оценке достоверности и точности численного решения нестационарных динамических задач // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия проблемы комплексной безопасности. – 2007. – № 3. – С. 48–60.
5. Мусаев В.К. Оценка достоверности и точности результатов вычислительного эксперимента при решении задач нестационарной волновой теории упругости // Научный журнал проблем комплексной безопасности. – 2009. – № 1. – С. 55–80.
6. Мусаев В.К. О достоверности результатов математического моделирования нестационарных волн напряжений в объектах сложной формы // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2014. – № 3. – С. 71–76.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Мусаев В.К. Численное решение задачи о распространении нестационарных упругих волн напряжений в подкрепленном круглом отверстии // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 2. – С. 93–97.