УДК 539.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ АВАРИЙНОМ РАЗЛИВЕ НЕФТИ В ВОДНУЮ СРЕДУ

Мусаев В.К.

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

Для прогноза безопасности уникальных сооружений, находящихся в водной, нефтяной и твердой деформируемой среде, при волновых воздействиях применяется численное моделирование. На основе метода конечных элементов в перемещениях разработаны методика, алгоритм и комплекс программ для решения линейных двумерных плоских задач, которые позволяют решать сложные задачи при волновых воздействиях на сооружения. Основные соотношения метода конечных элементов получены с помощью принципа возможных перемещений. Матрица упругости выражена через скорость продольных волн, скорость поперечных волн и плотность. Рассмотрена задача об ударном аварийном выбросе нефти в сложной системе, которая состоит из следующих деформируемых сред: нефтяная, водная и твердая. Рассмотрена задача об ударном аварийном выбросе нефти в сложной системе, которая состоит из разных деформируемых сред (водной, нефтяной и твердой), а так же из твердого деформируемого саркофага (соотношение высоты к ширине один к семи). Рассмотрим задачу об ударном аварийном выбросе нефти в сложной системе, которая состоит из разных деформируемых сред (водной, нефтяной и твердой), а так же из твердого деформируемого саркофага (соотношение высоты к ширине два к семи). Рассмотрим задачу об ударном аварийном выбросе нефти в сложной системе, которая состоит из разных деформируемых сред (водной, нефтяной и твердой), а так же из твердого деформируемого саркофага (соотношение высоты к ширине три к семи).

Ключевые слова: прогноз безопасности, уникальное сооружение, водная среда, нефтяная среда, деформируемая среда, волновое воздействие, ударное нестационарное воздействие, саркофаг, сооружение, конструкция, матрица упругости, скорость продольных волн, скорость поперечных волн, плотность, сложная система, численный метод, алгоритм, комплекс программ Мусаева В.К., нестационарные волновые уравнения, динамика сплошных сред, переходной процесс, распространение волн, волновая теория ударной безопасности

MATHEMATICAL MODELING ENVIRONMENTAL SECURITY IN CASE OF EMERGENCY OIL SPILL IN THE AQUATIC ENVIRONMENT

Musayev V.K.

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

To forecast the safety of unique structures in water, oil and deformable environment by wave action applied numerical modeling. On the basis of the finite element method in displacements the developed method, algorithm and program complex for solving linear flat two-dimensional tasks, which allow to solve complex problems by wave action on structures. Basic relations of the finite element method obtained by using the principle of possible displacements. The elasticity matrix is expressed through the speed of longitudinal waves, shear velocity and density. The problem about the shock of the accidental release of oil in the complex system, which consists of the following deformable media: oil, water and solid. The problem about the shock of the accidental release of oil in the complex system, which consists of a variety of deformable media (water, oil and solid) and solid wrought sarcophagus (height / width ratio of one to seven). Let's consider the task about the shock of the accidental release of oil in the complex system, which consists of a variety of deformable media (water, oil and solid) and solid wrought sarcophagus (the ratio of height to width of two to seven). Let's consider the task about the shock of the accidental release of oil in the complex system, which consists of a variety of deformable media (water, oil and solid) and solid wrought sarcophagus (the ratio of height to width of three to seven).

Keywords: forecast of safety, unique structure, water medium, oil medium, deformable medium, wave impact, impact of unsteady effects, the sarcophagus construction, design, matrix elasticity, speed of longitudinal waves, shear velocity, density, complex system, numerical method, algorithm, software complex Musayev V.K., non-stationary wave equations, dynamics of continuous media, transient, wave propagation, wave theory of impact safety

В настоящее время вопросам безопасности окружающей среды от ударных воздействий (выбросе) нефти в водную, нефтяную и твердую деформируемую среды уделяется большое внимание. Применение моделей и методов волновой теории упругости позволит реализовать поставленную проблему.

Расчеты проводились при следующих единицах измерения: килограмм-сила (кгс); сантиметр (см); секунда (с). Для перехода в другие единицы измерения были приняты следующие допущения: 1 кгс/см^2 ≈ 0,098 МПа; 1 кгс·с^2/см^4 ≈ 0,98·10^9 кг/м^3.

Для твердой деформируемой среды приняты следующие исходные данные: $H = \Delta x = \Delta y$; $\Delta t = 1{,}393 \cdot 10^{-6}$ с; $E = 3{,}09 \cdot 10^4$ МПа ($3{,}15 \cdot 10^5$ кгс/см^2); $\nu = 0{,}2$; $\rho = 0{,}25 \cdot 10^4$ кг/м^3 ($0{,}255 \cdot 10^{-5}$ кгс·с^2/см^4); $C_p = 3587$ м/с; $C_S = 2269$ м/с.

Для водной деформируемой среды приняты следующие исходные данные: $H = \Delta x = \Delta y$; $\Delta t = 3{,}268 \cdot 10^{-6}$ с; $\rho = 1{,}025 \cdot 10^3$ кг/м^3 ($1{,}045 \cdot 10^{-6}$ кгс·с^2/см^4); $C_p = 1530$ м/с.

Для нефтяной деформируемой среды приняты следующих исходные данные: $H = \Delta x = \Delta y$; $\Delta t = 3{,}876 \cdot 10^{-5}$ с; $\rho = 0{,}825 \cdot 10^3$ кг/м^3 ($0{,}841 \cdot 10^{-6}$ кгс·с^2/см^4); $C_p = 1290$ м/с.

Информация о моделировании нестационарных упругих волн напряжений в деформируемых областях с помощью рассматриваемого численного метода приведена в следующих работах [1–10].

В работах [1, 4, 6–8] приведена информация о верификации применяемого численного метода, алгоритма и комплекса программ.

1. Рассмотрим задачу об ударном аварийном выбросе нефти (рис. 2) в сложной системе, которая состоит из следующих деформируемых сред: нефтяная, водная и твердая (рис. 1). На контуре KL приложено нормальное воздействие σ_y, которое при $0 \le n \le 11$ ($n = t/\Delta t$) изменяется линейно от 0 до P, при $11 \le n \le 30$ равно P и при $30 \le n \le 40$ от P до 0 ($P = \sigma_0$, $\sigma_0 = 0{,}098$ МПа (1 кгс/см^2)). Граничные условия для контура ABCGJD при $t > 0$ $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$. Отраженные волны от контура ABCGJD не доходят до исследуемых точек при $0 \le n \le 500$.

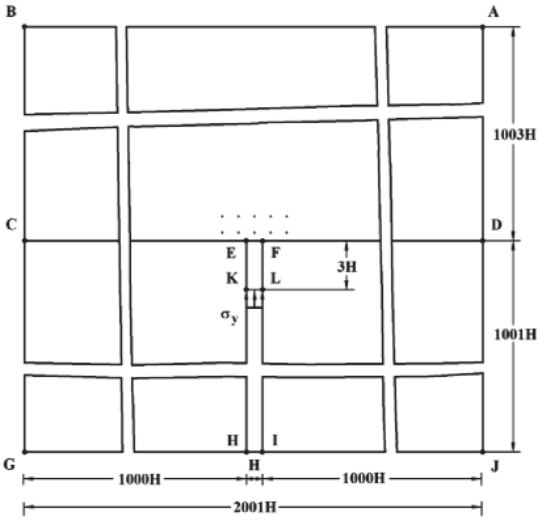

Рис. 1. Постановка задачи об ударном аварийном выбросе нефти в сложной деформируемой системе

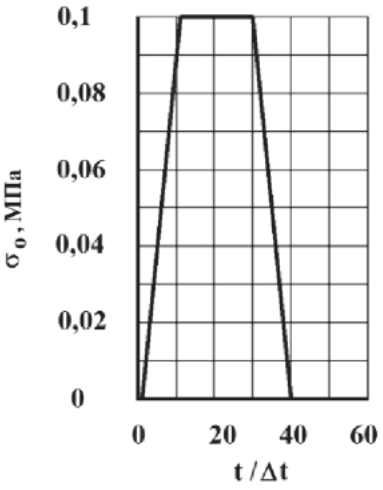

Рис. 2. Ударное воздействие

Твердые деформируемые среды ECGHK и DFLIJ. Водная деформируемая среда ABCEFD. Нефтяная деформируемая среда FEKHIL. На границе материалов с разными свойствами приняты условия непрерывности перемещений.

При расчетах принимается минимальный шаг по времени $\Delta t = 1{,}393 \cdot 10^{-6}$ с. Исследуемая расчетная область имеет 4014010 узловых точек. Решается система уравнений из 16056040 неизвестных.

2. Рассмотрим задачу об ударном аварийном выбросе нефти (рис. 2) в сложной системе, которая состоит из разных деформируемых сред (водной, нефтяной и твердой), а так же из твердого деформируемого саркофага (соотношение высоты к ширине один к семи) (рис. 3).

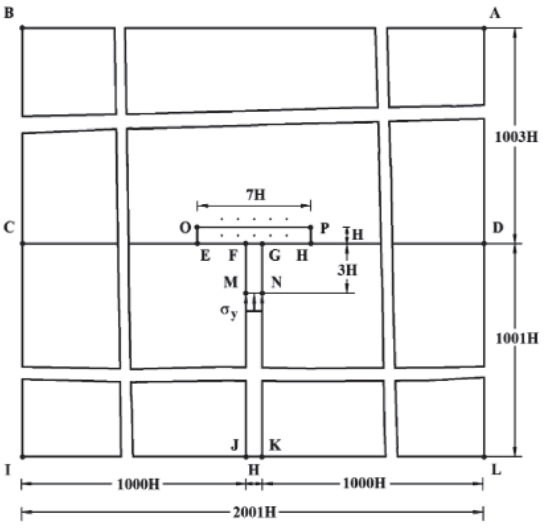

Рис. 3. Постановка задачи об ударном аварийном выбросе нефти в сложной деформируемой системе с саркофагом (плита: соотношение высоты к ширине один к семи)

На контуре *MN* приложено нормальное воздействие σ_y, которое при $0 \le n \le 11$ ($n = t/\Delta t$) изменяется линейно от 0 до *P*, при $11 \le n \le 30$ равно *P* и при $30 \le n \le 40$ от *P* до 0 ($P = \sigma_0$, $\sigma_0 = 0{,}098$ МПа (1 кгс/см^2)). Граничные условия для контура ABCILD при $t > 0$ $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$. Отраженные волны от контура ABCILD не доходят до исследуемых точек при $0 \le n \le 500$. Твердые деформируемые среды FECIJM, DHGNKL и POEFGH. Водная деформируемая среда ABCEOPHD. Нефтяная деформируемая среда GFMJKN. На границе материалов с разными свойствами приняты условия непрерывности перемещений. При расчетах принимается минимальный шаг по времени $\Delta t = 1{,}393 \cdot 10^{-6}$ с. Исследуемая расчетная область имеет 4014010 узловых точек. Решается система уравнений из 16056040 неизвестных.

3. Рассмотрим задачу об ударном аварийном выбросе нефти (рис. 2) в сложной системе, которая состоит из разных деформируемых сред (водной, нефтяной и твердой), а так же из твердого деформируемого саркофага (соотношение высоты к ширине два к семи) (рис. 4). На контуре *MN* приложено нормальное воздействие σ_y, которое при $0 \le n \le 11$ ($n = t/\Delta t$) изменяется линейно от 0 до *P*, при $11 \le n \le 30$ равно *P* и при $30 \le n \le 40$ от *P* до 0 ($P = \sigma_0$, $\sigma_0 = 0{,}098$ МПа (1 кгс/см^2)). Граничные условия для контура ABCILD при $t > 0$ $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$. Отраженные волны от контура ABCILD не доходят до исследуемых точек при $0 \le n \le 500$. Твердые деформируемые среды FECIJM, DHGNKL и QOPEFGHR. Водная деформируемая среда ABCEPOQRHD. Нефтяная деформируемая среда GFMJKN. На границе материалов с разными свойствами приняты условия непрерывности перемещений. При расчетах принимается минимальный шаг по времени $\Delta t = 1{,}393 \cdot 10^{-6}$ с. Исследуемая расчетная область имеет 4014010 узловых точек. Решается система уравнений из 16056040 неизвестных.

4. Рассмотрим задачу об ударном аварийном выбросе нефти (рис. 2) в сложной системе, которая состоит из разных деформируемых сред (водной, нефтяной и твердой), а так же из твердого деформируемого саркофага (соотношение высоты к ширине три к семи) (рис. 5).

На контуре *MN* приложено нормальное воздействие σ_y, которое при $0 \le n \le 11$ ($n = t/\Delta t$) изменяется линейно от 0 до *P*, при $11 \le n \le 30$ равно *P* и при $30 \le n \le 40$ от *P* до 0 ($P = \sigma_0$, $\sigma_0 = 0{,}098$ МПа (1 кгс/см^2)). Граничные условия для контура ABCILD при $t > 0$ $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$. Отраженные волны от контура ABCILD не доходят до исследуемых точек при $0 \le n \le 500$. Твердые деформируемые среды FECIJM, DHGNKL и ROPQEFGHTS. Водная деформируемая среда ABCEQPORSTHD. Нефтяная деформируемая среда GFMJKN. При расчетах принимается минимальный шаг по времени $\Delta t = 1{,}393 \cdot 10^{-6}$ с. На границе материалов с разными свойствами приняты условия непрерывности перемещений. Исследуемая расчетная область имеет 4014010 узловых точек. Решается система уравнений из 16056040 неизвестных.

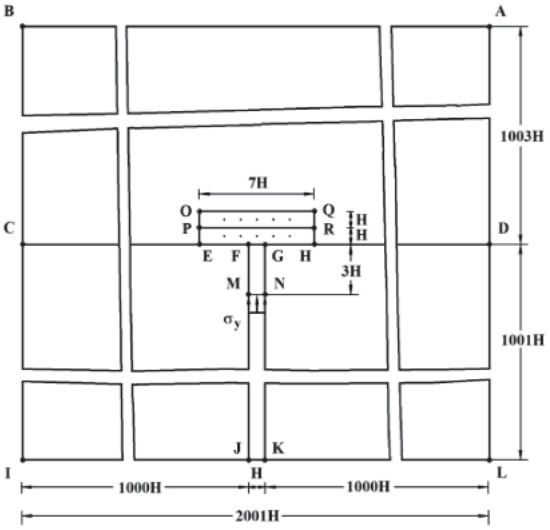

Рис. 4. Постановка задачи об ударном аварийном выбросе нефти в сложной деформируемой системе с саркофагом (плита: соотношение высоты к ширине два к семи)

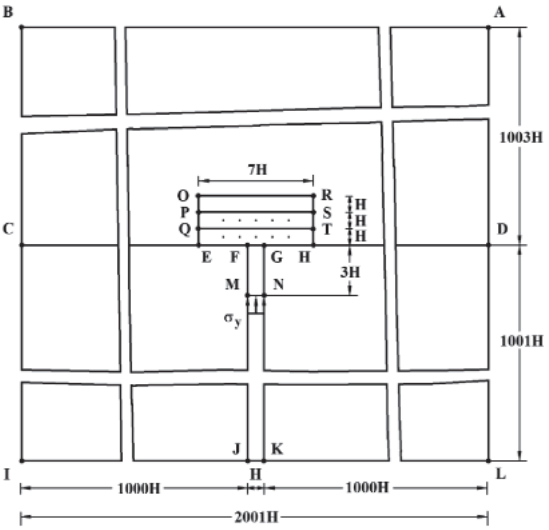

Рис. 5. Постановка задачи об ударном аварийном выбросе нефти в сложной деформируемой системе с саркофагом (плита: соотношение высоты к ширине три к семи)

Выводы

1. Для прогноза безопасности уникальных сооружений, находящихся в водной, нефтяной и твердой деформируемой среде, при волновых воздействиях применяется численное моделирование.

2. На основе метода конечных элементов в перемещениях разработаны методика, алгоритм и комплекс программ для решения линейных двумерных плоских задач, которые позволяют решать сложные задачи при волновых воздействиях на сооружения. Основные соотношения метода конечных элементов получены с помощью принципа возможных перемещений. Матрица упругости выражена через скорость продольных волн, скорость поперечных волн и плотность.

3. Исследуемая область разбивается по пространственным переменным на треугольные конечные элементы с тремя узловыми точками с линейной аппроксимацией упругих перемещений и на прямоугольные конечные элементы с четырьмя узловыми точками с билинейной аппроксимацией упругих перемещений. По временной переменной исследуемая область разбивается на линейные конечные элементы с двумя узловыми точками с линейной аппроксимацией упругих перемещений. За основные неизвестные приняты два перемещения и две скорости перемещений в узле конечного элемента.

4. Задачи решаются методом сквозного счета, без выделения разрывов. Применяется кусочно-линейная аппроксимация для уменьшения влияния разрывов на точность результатов численного решения, полученных с помощью метода конечных элементов в перемещениях.

5. Линейная динамическая задача с начальными и граничными условиями в виде дифференциальных уравнений в частных производных, для решения задач при волновых воздействиях, с помощью метода конечных элементов в перемещениях приведена к системе линейных обыкновенных дифференциальных уравнений с начальными условиями, которая решается по явной двухслойной схеме.

6. Рассмотрена задача о моделировании ударного воздействия (выбросе) нефти в водную, нефтяную и деформируемую среды. Исследуемая расчетная область имеет 4014010 узловых точек. Решается система уравнений из 16056040 неизвестных.

7. Рассмотрена задача о моделировании саркофага (соотношение высоты к ширине один к семи) в водной среде для уменьшения ударного воздействия (выброса) нефти из скважины. Исследуемая расчетная область имеет 4014010 узловых точек. Решается система уравнений из 16056040 неизвестных.

8. Рассмотрена задача о моделировании саркофага (соотношение высоты к ширине два к семи) в водной среде для уменьшения ударного воздействия (выброса) нефти из скважины. Исследуемая расчетная область имеет 4014010 узловых точек. Решается система уравнений из 16056040 неизвестных.

9. Рассмотрена задача о моделировании саркофага (соотношение высоты к ширине три к семи) в водной среде для уменьшения ударного воздействия (выброса) нефти из скважины. Исследуемая расчетная область имеет 4014010 узловых точек. Решается система уравнений из 16056040 неизвестных.

10. Полученные результаты можно оценить как первое приближение к решению сложной комплексной задачи о безопасности уникальных сооружений, находящихся в водной, нефтяной и твердой деформируемой среде, с помощью численного моделирования волновых уравнений теории упругости.

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. Моделирование упругих напряжений в защитной оболочке реакторного отделения атомной станции с фундаментом и основанием (полуплоскость) при нестационарном ударном воздействии // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 12–5. – С. 587–592.

4. Мусаев В.К. Оценка точности и достоверности численного моделирования при решении задач об отражении и интерференции нестационарных упругих волн напряжений // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 1–7. – С. 1184–1187.

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

6. Мусаев В.К. Численное решение задачи о распространении нестационарных упругих волн напряжений в подкрепленном круглом отверстии // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 2. – С. 93–97.

7. Мусаев В.К. Решение задачи о распространении плоских продольных волн в виде импульсного воздействия // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 4–2. – С. 326–330.

8. 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.

9. Мусаев В.К. Математическое моделирование нестационарного аварийного выброса нефти в сложной многофазной деформируемой среде // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 3–1. – С. 28–32.

10. Мусаев В.К. Моделирование динамических напряжений в упругой полуплоскости при горизонтальном сосредоточенном нестационарном воздействии воздушной ударной волны // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 3–2. – С. 222–226.