УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САРКОФАГА (СООТНОШЕНИЕ ШИРИНЫ К ВЫСОТЕ СЕМЬ К ОДНОМУ, ДВУМ И ТРЕМ) В ВОДНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ УДАРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ (ВЫБРОСА) НЕФТИ ИЗ СКВАЖИНЫ

Мусаев В.К.

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

Для прогноза безопасности технической системы, находящейся в водной, нефтяной и твердой деформируемой среде, при волновых воздействиях, применяется численное моделирование. Для решения поставленной задачи применяются уравнения нестационарной динамической теории упругости. Для решения двумерной нестационарной динамической задачи математической теории упругости с начальными и граничными условиями используем метод конечных элементов в перемещениях. 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 задача о моделировании саркофага (соотношение ширины к высоте семь к одному, двум и трем) в водной среде для уменьшения ударного воздействия (выброса) нефти из скважины. Моделируются водная, нефтяная и деформируемая среды. Показано, что применение саркофага позволяет обеспечить безопасность технической системы и окружающей среды при внезапном выбросе нефти из скважины.

Ключевые слова: моделирование безопасности, саркофаг, уникальное сооружение, водная среда, нефтяная среда, твердая среда, деформируемые среды, нестационарное волновое воздействие, волновая теория ударной безопасности, ударное воздействие, импульсное воздействие, выброс нефти из скважины, численный метод, алгоритм, комплекс программ Мусаева В.К., верификация, оценка физической достоверности, оценка математической точности, физические процессы, переходной процесс, механические процессы

NUMERICAL SIMULATION OF THE SARCOPHAGUS (THE RATIO OF WIDTH TO HEIGHT OF SEVEN TO ONE, TWO AND THREE) IN THE AQUATIC ENVIRONMENT TO REDUCE THE IMPACT (EMISSIONS) OF OIL FROM WELLS

Musayev V.K.

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

For the prediction of safety of technical systems in water, oil and deformable environment by wave action, applied numerical modelling. To solve the tasks used the equations of non-stationary dynamic theory of elasticity. For solving two-dimensional nonstationary dynamic problems of mathematical elasticity theory with initial and boundary conditions we use the method of finite elements in displacements. 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. The problem of the modeling of the sarcophagus (the ratio of width to height of seven to one, two and three) in the aquatic environment to reduce the impact (emissions) of oil from wells. Modeled water, oil and deformable medium. It is shown that the use of the sarcophagus allows you to ensure the safety of the technical system and the environment in a sudden release of oil from the well.

Keywords: modeling safety, sarcophagus, unique structure, water medium, oil medium, solid medium, a deformable medium, the transient wave impact, the wave theory of impact security, shock action, pulse impact, the release of oil from the well, a numerical method, algorithm, software complex Musayev V.K., verification, assessment of physical authenticity, the assessment of mathematical precision, the physical processes, the transition process, mechanical processes

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.

Поставленная задача реализуется с помощью численного метода, алгоритма и комплекса программ Мусаева В.К. [1–10].

Постановка нестационарной волновой задачи

Рассмотрим задачу о нестационарном волновом воздействии на сооружение, которое находится в воздушной и твердой деформируемой среде.

Рассмотрим некоторое тело, состоящее из трех разных областей $\Gamma^{(1)}$ (водная среда), $\Gamma^{(2)}$ (нефтяная среда) и $\Gamma^{(3)}$ (твердая среда) (рис. 1) в прямоугольной декартовой системе координат XOY, которому в начальный момент времени $t=0$ сообщается механическое воздействие.

Предположим, что тело $\Gamma^{(1)}$ изготовлено из деформируемой водной среды и является однородным изотропным материалом, подчиняющегося упругому закону Гука при малых упругих деформациях. Если в деформируемом твердом теле предположим, что поперечная скорость распространения равна нулю, то можно получить уравнения состояния для водной среды.

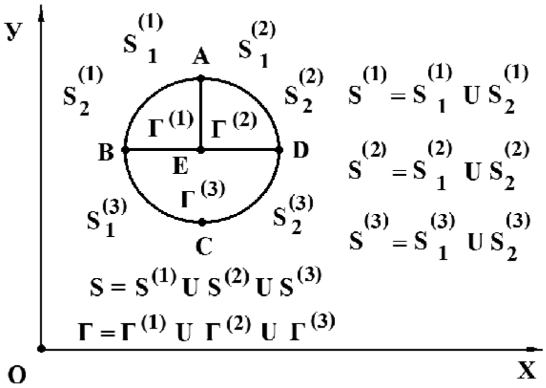

Рис. 1. Некоторое тело, состоящее из трех разных областей $Г^{(1)}$, $Г^{(2)}$ и $Г^{(3)}$ в прямоугольной декартовой системе координат XOY

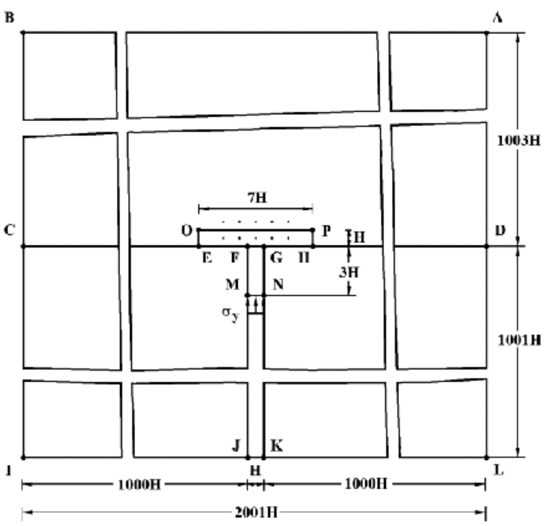

Рис. 2. Постановка задачи об ударном аварийном выбросе нефти в сложной деформируемой системе с саркофагом (плита: соотношение высоты к ширине один к семи)

Точные уравнения двумерной плоской динамической теории упругости для области $Г^{(1)}$ имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_x^{(1)}}{\partial x} = \rho^{(1)} \frac{\partial^2 u^{(1)}}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial \sigma_y^{(1)}}{\partial y} = \rho^{(1)} \frac{\partial^2 v^{(1)}}{\partial t^2},$$

$$(x, y) \in \Gamma^{(1)},$$

$$\sigma_x^{(1)} = \rho^{(1)} C_p^{2(1)} \varepsilon_x^{(1)} + \rho^{(1)} C_p^{2(1)} \varepsilon_y^{(1)},$$

$$\sigma_y^{(1)} = \rho^{(1)} C_p^{2(1)} \varepsilon_y^{(1)} + \rho^{(1)} C_p^{2(1)} \varepsilon_x^{(1)},$$

$$\varepsilon_x^{(1)} = \frac{\partial u^{(1)}}{\partial x}, \quad \varepsilon_y^{(1)} = \frac{\partial v^{(1)}}{\partial y},$$

$$(x, y) \in (\Gamma^{(1)} \cup S^{(1)}), \qquad (1)$$

где $\sigma_x^{(1)}$ и $\sigma_y^{(1)}$ – компоненты тензора упругих напряжений; $\varepsilon_x^{(1)}$ и $\varepsilon_y^{(1)}$ – компоненты тензора упругих деформаций; $u^{(1)}$ и $v^{(1)}$ – составляющие вектора упругих перемещений вдоль осей OX и OY соответственно; $\rho^{(1)}$ – плотность материала; $C_p^{(1)}$ – скорость продольной упругой волны; $S^{(1)}(S_1^{(1)} \bigcup S_2^{(1)})$ – граничный контур тела $Г^{(1)}$.

Систему (1) в области, занимаемой телом $Г^{(1)}$, следует интегрировать при начальных и граничных условиях.

Предположим, что тело $Г^{(2)}$ изготовлено из деформируемой нефтяной среды и является однородным изотропным материалом, подчиняющегося упругому закону Гука при малых упругих деформациях. Если в деформируемом твердом теле предположим, что поперечная скорость распространения равна нулю, то можно получить уравнения состояния для нефтяной среды.

Точные уравнения двумерной плоской динамической теории упругости для области $Г^{(2)}$ имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_x^{(2)}}{\partial x} = \rho^{(2)} \frac{\partial^2 u^{(2)}}{\partial t^2}, \quad \frac{\partial \sigma_y^{(2)}}{\partial y} = \rho^{(2)} \frac{\partial^2 v^{(2)}}{\partial t^2},$$

$$(x, y) \in \Gamma^{(2)},$$

$$\sigma_x^{(2)} = \rho^{(2)} C_p^{2(2)} \varepsilon_x^{(2)} + \rho^{(2)} C_p^{2(2)} \varepsilon_y^{(2)},$$

$$\sigma_y^{(2)} = \rho^{(2)} C_p^{2(2)} \varepsilon_y^{(2)} + \rho^{(2)} C_p^{2(2)} \varepsilon_x^{(2)},$$

$$\varepsilon_x^{(2)} = \frac{\partial u^{(2)}}{\partial x}, \quad \varepsilon_y^{(1)} = \frac{\partial v^{(2)}}{\partial y},$$

$$(x, y) \in (\Gamma^{(2)} \cup S^{(2)}), \qquad (2)$$

где $\sigma_x^{(2)}$ и $\sigma_y^{(2)}$ – компоненты тензора упругих напряжений; $\varepsilon_x^{(2)}$ и $\varepsilon_y^{(2)}$ – компоненты тензора упругих деформаций; $u^{(2)}$ и $v^{(2)}$ – составляющие вектора упругих перемещений вдоль осей OX и OY соответственно; $\rho^{(2)}$ – плотность материала; $C_p^{(2)}$ – скорость продольной упругой волны; $S^{(2)}(S_1^{(2)} \quad S_2^{(2)})$ – граничный контур тела $Г^{(2)}$.

Систему (2) в области, занимаемой телом $Г^{(2)}$, следует интегрировать при начальных и граничных условиях.

Точные уравнения двумерной плоской динамической теории упругости для области $\Gamma^{(3)}$ (твердая среда) имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_x^{(3)}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}^{(3)}}{\partial y}=\rho^{(3)}\frac{\partial^2 u^{(3)}}{\partial t^2},$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}^{(3)}}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_y^{(3)}}{\partial y}=\rho^{(3)}\frac{\partial^2 v^{(3)}}{\partial t^2},$$

$$(x,y)\in\Gamma^{(3)},$$

$$\sigma_x^{(3)}=\rho^{(3)}C_p^{2(3)}\varepsilon_x^{(3)}+\rho^{(3)}(C_p^{2(3)}-2C_s^{2(3)})\varepsilon_y^{(3)},$$

$$\sigma_y^{(3)}=\rho^{(3)}C_p^{2(3)}\varepsilon_y^{(3)}+\rho^{(3)}(C_p^{2(3)}-2C_s^{2(3)})\varepsilon_x^{(3)},$$

$$\tau_{xy}^{(3)}=\rho^{(3)}C_s^{2(3)}\gamma_{xy}^{(3)},$$

$$\varepsilon_x^{(3)}=\frac{\partial u^{(3)}}{\partial x},\ \varepsilon_y^{(3)}=\frac{\partial v^{(3)}}{\partial y},$$

$$\gamma_{xy}^{(3)}=\frac{\partial u^{(3)}}{\partial y}+\frac{\partial v^{(3)}}{\partial x},$$

$$(x,y)\in(\Gamma^{(3)}\cup S^{(3)}), \qquad (3)$$

где $\sigma_x^{(3)}$, $\sigma_y^{(3)}$ и $\tau_{xy}^{(3)}$ – компоненты тензора упругих напряжений; $\varepsilon_x^{(3)}$, $\varepsilon_y^{(3)}$ и $\gamma_{xy}^{(3)}$ – компоненты тензора упругих деформаций; $u^{(3)}$ и $v^{(2)}$ – составляющие вектора упругих перемещений вдоль осей OX и OY соответственно; $\rho^{(3)}$ – плотность материала; $C_p^{(3)}$ – скорость продольной упругой волны; $C_s^{(3)}$ – скорость поперечной упругой волны; $S^{(3)}(S_1^{(3)}\bigcup S_2^{(3)})$ – граничный контур тела $\Gamma^{(3)}$.

Систему (3) в области, занимаемой телом $\Gamma^{(3)}$, следует интегрировать при начальных и граничных условиях.

В работах [1, 3–6] приведена информация о верификации (оценка достоверности и точности) применяемого численного метода, алгоритма и комплекса программ.

Постановка задачи об ударном аварийном выбросе нефти

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: $H=\Delta x=\Delta y$; Δt = 1,393·10^{-6} с; E = 3,09·10 ^{4} МПа (3,15·10 ^{5} кгс/см^2); ν= 0,2; ρ= 0,25·10^4 кг/м^3 (0,255·10^{-5} кгс с^2/см^4); C_p = 3587 м/с; C_s = 2269 м/с. Для водной деформируемой среды приняты следующие исходные данные: $H=\Delta x=\Delta y$; Δt = 3,268·10^{-6} с; ρ = 1,025·10^3 кг/м^3 (1,045·10 $^{-6}$ кгс с^2/см^4); C_p = 1530 м/с. Для нефтяной деформируемой среды приняты следующие исходные данные: $H=\Delta x=\Delta y$; Δt = 3,876·10^{-5} с; ρ = 0,825·10^3 кг/м^3 (0,841·10^{-6} кгс с^2/см^4); C_p = 1290 м/с.

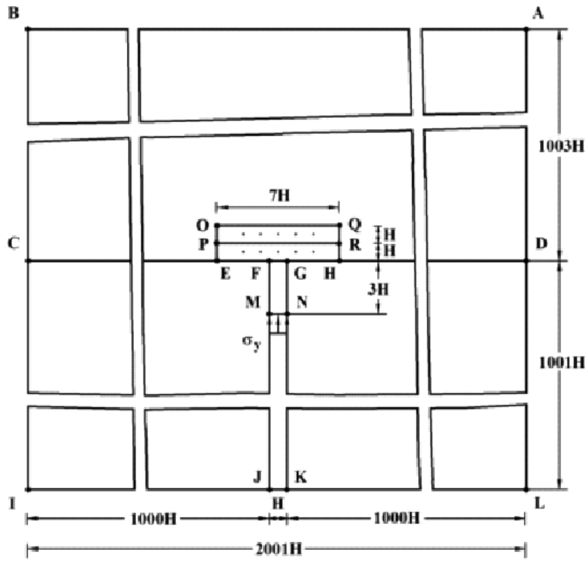

Рис. 3. Постановка задачи об ударном аварийном выбросе нефти в сложной деформируемой системе с саркофагом (плита: соотношение высоты к ширине два к семи)

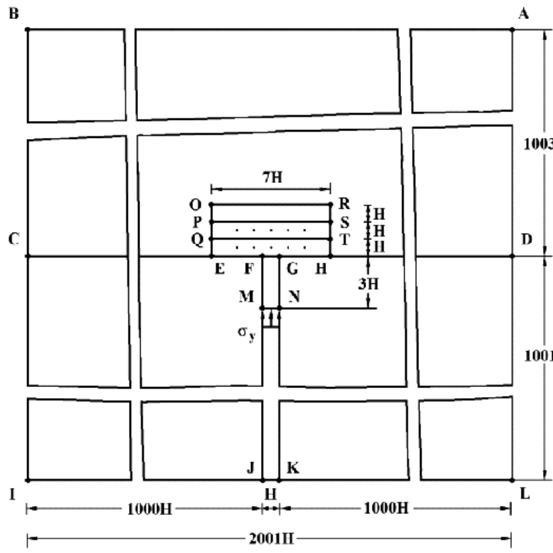

Рис. 4. Постановка задачи об ударном аварийном выбросе нефти в сложной деформируемой системе с саркофагом (плита: соотношение высоты к ширине три к семи)

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 один к семи) (рис. 2). 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.

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) (рис. 3). 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.

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) (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 *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.

Результаты расчетов были получены для нормального напряжения

$$\bar{\sigma}_x \left(\bar{\sigma}_x = \sigma_x / |\sigma_0| \right),$$

для нормального напряжения

$$\bar{\sigma}_y \left(\bar{\sigma}_y = \sigma_y / |\sigma_0| \right)$$

и для касательного напряжения

$$\bar{\tau}_{xy} \left(\bar{\tau}_{xy} = \tau_{xy} / |\sigma_0| \right)$$

во времени n в точках $B1$–$B10$, которые показаны на рис. 2–4 и на рис. 5.

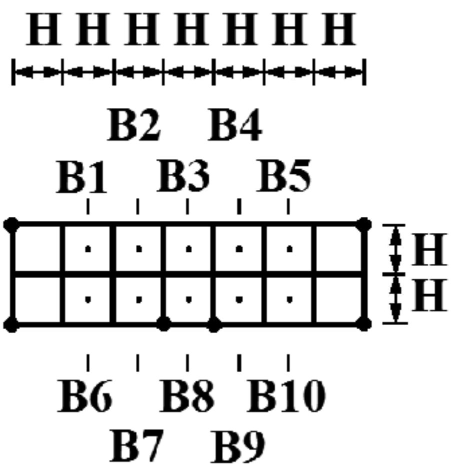

Рис. 5. Точки B1–B10, в которых получены компоненты тензора напряжений

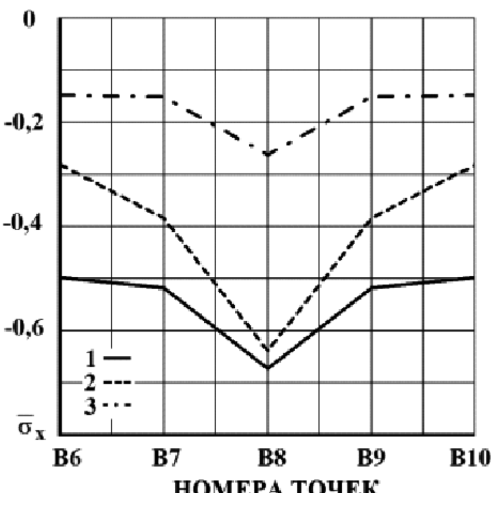

Рис. 6. Изменение максимальных сжимающих величин упругого нормального напряжения $\bar{\sigma}_x$ *в точках B6–B10 в задачах с саркофагом:*
1 – плита: соотношение высоты к ширине один к семи;
2 – плита: соотношение высоты к ширине два к семи; плита:
3 – соотношение высоты к ширине три к семи

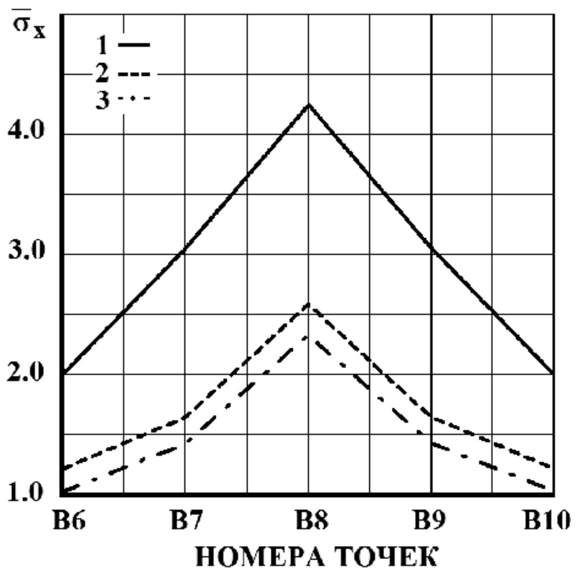

Рис. 7. Изменение максимальных растягивающих величин упругого нормального напряжения $\bar{\sigma}_x$ *в точках B6–B10 в задачах с саркофагом:*
1 – плита: соотношение высоты к ширине один к семи; 2 – плита: соотношение высоты к ширине два к семи; плита: 3 – плита: соотношение высоты к ширине три к семи

На рис. 6 показано изменение максимальных сжимающих величин упругого нормального напряжения $\bar{\sigma}_x$ в точках $B6$–$B10$ в задачах с саркофагом: 1 – плита: соотношение высоты к ширине один к семи; 2 – плита: соотношение высоты к ширине два к семи; плита: 3 – соотношение высоты к ширине три к семи.

На рис. 7 показано изменение максимальных растягивающих величин упругого нормального напряжения $\bar{\sigma}_x$ в точках $B6$–$B10$ в задачах с саркофагом: 1 – плита: соотношение высоты к ширине один к семи; 2 – плита: соотношение высоты к ширине два к семи; плита: 3 – соотношение высоты к ширине три к семи.

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

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Мусаев В.К. Моделирование нестационарных волн напряжений в бесконечной пластинке при вертикальном сосредоточенном упругом ударном воздействии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 3–1. – С. 33–37.

9. Мусаев В.К. Моделирование нестационарных волн напряжений в задаче о воздействии воздушной ударной волны на консоль (соотношение ширины к высоте один к десяти) с упругой полуплоскостью // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 3–1. – С. 38–42.

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.