

сейсмической безопасности / Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Коллективная монография. – Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2019. – С. 446-451.

4. Мусаев В.К. Математическое моделирование нестационарных упругих волн напряжений (переходной процесс) при воздействии (вертикальное сосредоточенное в виде треугольного импульса) на поверхность полуплоскости (задача Лэмба) // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – № 4. – С. 164-174.

5. Мусаев В.К. Математическое моделирование волн напряжений при сосредоточенном вертикальном воздействии в виде треугольного импульса: задача Лэмба // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2021. – № 2. – С. 112-120.

---

**Мусаев В.К.**

**Волновая теория сейсмической безопасности в задаче о моделировании напряжений в полуплоскости с вертикальной полостью из металла (соотношение ширины к высоте один к десяти)**

**Аннотация:** Решена задача о математическом моделировании нестационарных упругих волн напряжений в полуплоскости с полостью, заполненной металлом (соотношение ширины к высоте один к десяти), при сейсмическом воздействии в виде ступенчатой функции. Решается система уравнений из 8016008 неизвестных. В характерных областях исследуемой задачи получены контурные напряжения и компоненты тензора напряжений. Полость (соотношением ширины к высоте один к десяти), заполненная металлом, увеличивает величину упругого контурного напряжения. Это связано с увеличением акустической жесткости полости.

**Ключевые слова:** волновая теория сейсмической безопасности, комплекс программ Мусаева В.К., сейсмическое воздействие, ступенчатая функция,

вертикальная прямоугольная полость, металл, акустическая жесткость, контурные напряжения

В работе приводится численное решение задачи о моделировании нестационарных сейсмических волн в упругой полуплоскости с вертикальной прямоугольной полостью (соотношение ширины к высоте один к десяти), заполненной металлом.

Некоторые вопросы в области моделирования нестационарных динамических задач рассмотрены в следующих работах [1-6].

В работах [2,3] приведена информация о физической достоверности и математической точности моделирования нестационарных волн напряжений в деформируемых телах с помощью рассматриваемого численного метода, алгоритма и комплекса программ.

Принимая во внимание определение матрицы жесткости, вектора инерции и вектора внешних сил для некоторого тела, записываем приближенное значение уравнения движения в теории упругости [2-6]

$$\bar{H}\ddot{\vec{\Phi}} + \bar{K}\vec{\Phi} = \vec{R}, \quad \vec{\Phi}|_{t=0} = \vec{\Phi}_0, \quad \dot{\vec{\Phi}}|_{t=0} = \dot{\vec{\Phi}}_0, \quad (1)$$

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

Таким образом, с помощью метода конечных элементов в перемещениях, линейную задачу с начальными и граничными условиями привели к линейной задаче Коши (1).

Задание различных физических свойств, для каждого конечного элемента, позволяет с помощью метода конечных элементов в перемещениях решать двумерные плоские динамические задачи теории упругости для областей различной формы [2-6].

Интегрируя по временной координате соотношение (1) с помощью конечноэлементного варианта метода Галеркина, получим двумерную явную двухслойную схему [2-6]

$$\vec{\Phi}_{i+1} = \vec{\Phi}_i + \Delta t \bar{H}^{-1}(-\bar{K}\vec{\Phi}_i + \vec{R}_i), \quad \dot{\vec{\Phi}}_{i+1} = \dot{\vec{\Phi}}_i + \Delta t \dot{\vec{\Phi}}_{i+1}, \quad (2)$$

Таким образом, из системы с бесконечным числом неизвестных перешли к системе с конечным числом неизвестных (2).

Общая теория численных уравнений математической физики требует для этого наложение определенных условий на отношение шагов по временной координате и по пространственным координатам, а именно [2-6]

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

где:  $\Delta t$  – шаг по временной координате;  $\Delta l$  – длина стороны конечного элемента;  $r$  – общее число конечных элементов.

Аналитическое исследование устойчивости явной двухслойной схемы связано с большими трудностями, поэтому устойчивость явной двухслойной схемы исследуем с помощью численного эксперимента [2-6].

Результаты численного эксперимента показали, что при  $k = 0,5$  обеспечивается устойчивость явной двухслойной схемы в перемещениях для внутренних и граничных узловых точек на квазирегулярных сетках [2-6].

Для исследуемой области, состоящей из материалов с разными физическими свойствами, выбирается минимальный шаг по временной координате (3).

Рассматривается задача о воздействии плоской продольной нестационарной сейсмической волны, параллельной свободной поверхности упругой полуплоскости с полостью, заполненной металлом (соотношение ширины к высоте один к десяти) (рисунок 1).

Рассматриваемая задача впервые решена Мусаевым В.К. с помощью разработанной методики, алгоритма и комплекса программ [2-6].

Расчеты проводились при следующих единицах измерения: килограмм-сила (кгс); сантиметр (см); секунда (с).

От точки  $F$  параллельно свободной поверхности  $ABEFG$  приложено нормальное напряжение  $\sigma_x$ , которое при  $0 \leq n \leq 11$  ( $n = t/\Delta t$ ) изменяется линейно от 0 до  $P$ , а при  $n \geq 11$  равно  $P$  ( $P = \sigma_0, \sigma_0 = 0,1$  МПа (1 кгс/см<sup>2</sup>)). Граничные условия для контура  $GHIA$  при  $t > 0$   $u = v = \dot{u} = \dot{v} = 0$ . Отраженные волны от контура

$GHIA$  не доходят до исследуемых точек при  $0 \leq n \leq 1000$ . Контур  $ABEFG$  свободен от нагрузок, кроме точки  $F$ .

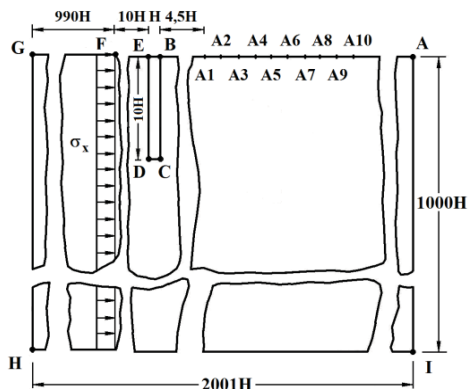


Рисунок 1 – Постановка задачи о воздействии плоской продольной сейсмической волны на упругую полуплоскость с полостью, заполненной металлом (соотношение ширины к высоте один к десяти)

Расчеты проведены при следующих исходных данных. Для области  $ABCDEFGH$ :  $H = \Delta x = \Delta y$ ;  $\Delta t = 1,393 \cdot 10^{-6}$  с;  $E = 3,15 \cdot 10^4$  МПа ( $3,15 \cdot 10^5$  кгс/см<sup>2</sup>);  $\nu = 0,2$ ;  $\rho = 0,255 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup> ( $0,255 \cdot 10^{-5}$  кгс·с<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>);  $C_p = 3587$  м/с;  $C_s = 2269$  м/с. Для области  $VEDC$ :  $H = \Delta x = \Delta y$ ;  $\Delta t = 9,309 \cdot 10^{-7}$  с;  $E = 2,06 \cdot 10^5$  МПа ( $2,1 \cdot 10^6$  кгс/см<sup>2</sup>);  $\nu = 0,3$ ;  $\rho = 0,784 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup> ( $0,8 \cdot 10^{-5}$  кгс·с<sup>2</sup>/см<sup>4</sup>);  $C_p = 5371$  м/с;  $C_s = 3177$  м/с.

При расчетах принимается минимальный шаг по времени  $\Delta t = 9,309 \cdot 10^{-7}$  с.

На границе материалов с разными свойствами приняты условия непрерывности перемещений.

Решается система уравнений из 8016008 неизвестных.

В качестве примера на рисунке 2 показано изменение упругого контурного напряжения  $\bar{\sigma}_k$  ( $\bar{\sigma}_k = \sigma_k / |\sigma_0|$ ) во времени  $n$  в точке  $A1$  (рисунок 1), находящихся на свободной поверхности упругой полуплоскости: 1 – в задаче без полости; 2 – в задаче с полостью

заполненной металлом (соотношение ширины к высоте один к десяти).

Расстояние между точками:  $A1$  и  $A2$  равно  $H$ .

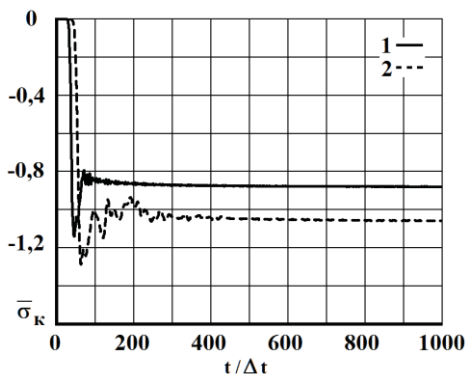


Рисунок 2 – Изменение упругого контурного напряжения  $\bar{\sigma}_k$  во времени  $t/\Delta t$  в точке  $A1$ : 1 – в задаче без полости; 2 – в задаче с полостью заполненной металлом (соотношение ширины к высоте один к десяти)

## Выводы

1. Прогноз сейсмической безопасности объекта, с помощью численного моделирования, позволяет снизить последствия природной чрезвычайной ситуации.

2. Разработаны методика, алгоритм и комплекс программ для решения линейных двумерных (плоских) задач сложной формы при волновых воздействиях.

3. С помощью численного эксперимента получена устойчивая двумерная явная двухслойная схема.

4. Решена задача о математическом моделировании нестационарных упругих волн напряжений в полуплоскости с полостью заполненной металлом (соотношение ширины к высоте один к десяти) при сейсмическом воздействии. Решается система уравнений из 8016008 неизвестных. Полость (соотношением ширины к высоте один к десяти) заполненной металлом, увеличивает величину упругого контурного напряжения. Это связано с увеличением акустической жесткости полости.

Литература:

1. *Кольский Г.* Волны напряжений в твердых телах. – М.: Иностранная литература, 1955. – 192 с.

2. *Musayev V.K.* Estimation of accuracy of the results of numerical simulation of unsteady wave of the stress in deformable objects of complex shape // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2015. – Volume 11. Issue 1. – P. 135-146.

3. *Musayev V.K.* On the mathematical modeling of nonstationary elastic waves stresses in corroborated by the round hole // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2015. – Volume 11. Issue 1. – P. 147-156.

4. *Musayev V.K.* Mathematical modeling of non-stationary elastic waves stresses under a concentrated vertical exposure in the form of delta functions on the surface of the half-plane (Lamb problem) // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2019. – Volume 15. Issue 2. – P. 111-124.

5. *Мусаев В.К.* Математическое моделирование нестационарных упругих волн напряжений в консоли с основанием (полуплоскость) при фундаментальном сейсмическом воздействии // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2019. – № 6. – С. 29-33.

6. *Мусаев В.К.* Математическое моделирование волн напряжений при сосредоточенном вертикальном воздействии в виде треугольного импульса: задача Лэмба // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2021. – № 2. – С. 112-120.

---

## Чернов К.В.

### Зрение работника и безопасность техногенной деятельности

**Аннотация:** Приводится описание зрения как сциентного процесса и того, как успешное транскодирование сциенции обуславливает безопасность техногенной деятельности.

**Ключевые слова:** техногенная деятельность, безопасность, фотон, сциенция хромопротеина, транскодирование, техносциенция