

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БОРТ КАРЬЕРА

С.Ф. Усманов – канд. техн. наук, доцент,

В.А. Коваленко – канд. техн. наук, доцент,

В.Г. Долгушев – ст. научн. сотрудник

Описываются результаты численного моделирования сейсмического воздействия на борт карьера. Для моделирования применяют метод конечных элементов. Также применяют программу пространственного моделирования "Adventure".

Ключевые слова: сейсмология; моделирование воздействия на карьер.

Численное моделирование процессов распространения сейсмических и ударных волн с использованием высокопроизводительного кластера позволяет оперативно прогнозировать последствия динамических нагрузок на горный массив и, тем самым, повышать эффективность и безопасность ведения горных работ.

Подготовка исходных данных для расчета динамических процессов, возникающих при действии ударных и сейсмических нагрузок, включает в себя построение трехмерной модели горного массива и ее разбиение на конечные элементы; задание геологической структуры и прочностных свойств горных пород; ввод граничных и начальных условий различных типов. Для этих целей в КРСУ была разработана программа *ImpactMesher* (В.Г. Долгушев), являющаяся усовершенствованной версией программы *MeshMaker*. Построение трехмерной модели производится по данным маркшейдерской съемки или по цифровой карте поверхности. Учет геологического строения массива осуществляется посредством декомпозиции конечно-элементной модели на пространственные домены с исполь-

зованием трехмерных селекторов и последующим определением для каждого домена прочностных свойств горных пород, хранящихся в специальной базе данных.

Отличительной особенностью программы *ImpactMesher* является возможность задания величин и направлений внешних динамических нагрузок в виде временных графиков (рис. 1). Динамические нагрузки и смещения могут быть заданы в векторном виде для отдельного произвольно выбранного элемента или для определенной группы элементов сеточной модели, лежащих на поверхности или внутри горного массива.

Расчет временных последовательностей абсолютных смещений для каждого из узлов конечно-элементной модели под действием динамических нагрузок осуществлялся с использованием свободно-распространяемой программы с открытым кодом *AdventureImpact*¹, которая предназначена для решения пространственно-

¹ ADVENTURE Project Home Page: <http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp/>

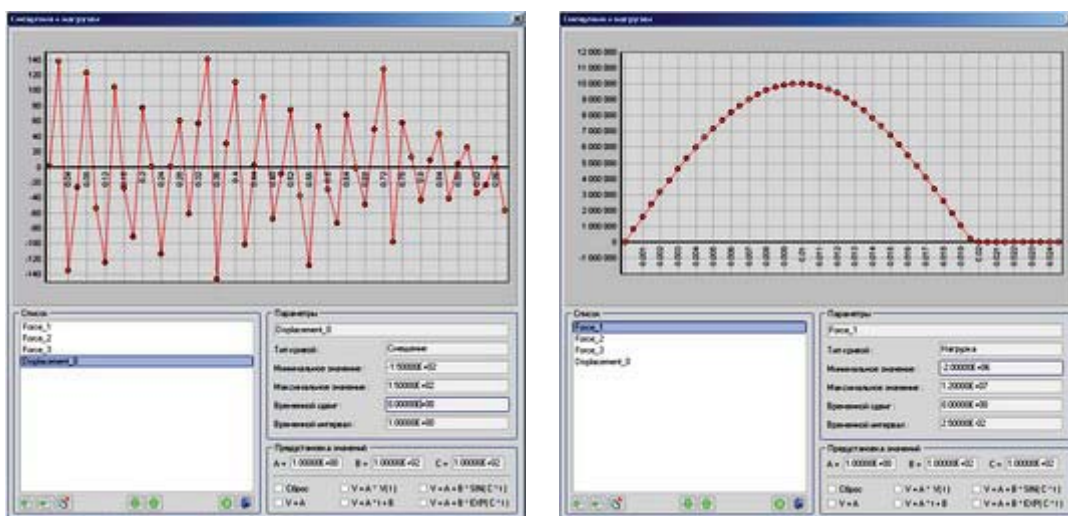


Рис. 1. Примеры временных графиков динамических нагрузок.

дискретизированных уравнений структурной динамики с использованием явных методов:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\}, \quad (1)$$

где $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ – векторы ускорений, скоростей и смещений; $[M]$, $[C]$, $[K]$ – матрицы масс, демпфирования и жесткости; $\{f\}$ – вектор нагрузок.

Дискретизация по времени уравнения (1) задается в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{(\Delta t)^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) \{u\}_{n+1} = \\ & = \{f\}_n - \left([K] - \frac{2}{(\Delta t)^2} [M] \right) \{u\}_n - \\ & - \left(\frac{1}{(\Delta t)^2} [M] + \frac{1}{2\Delta t} [C] \right) \{u\}_{n-1}, \end{aligned}$$

здесь Δt – временной шаг; $\{u\}_{n+1}$, $\{u\}_{n-1}$ – величины смещений на $(n+1)^{th}$ и $(n-1)^{th}$ шагах соответственно.

Метод иерархической декомпозиции модельной области и технологии параллельных вычислений, применяемые в программе AdventureImpact, обеспечивают высокую производительность при использовании на кластерных системах. В качестве входных данных, определяющих физико-механические свойства горных пород, используются модуль Юнга, коэффициент Пуассона, удельная плотность породы и коэффициент ударной вязкости. Выходными данными программы являются величины абсолютных смещений в узлах конечно-элементной модели для различных моментов времени.

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования сейсмического воздействия на горный массив. Сейсмическая нагрузка задавалась в виде временных графиков абсолютных смещений (рис. 3), приложенных к узлам, лежащим в основании массива. Конечно-элементная модель массива включает в себя 600 тыс. узлов и 4,2 млн. тетраэдральных элементов. Подготовка исходных данных для расчета (прочностные характеристики пород, диаграммы смещений, начальные и граничные условия и т.д.) выполнена при помощи программы ImpactMesher.

Для последующего анализа полученных данных, представляющих собой величины смещений узлов сеточной модели для различных моментов времени, была разработана программа ImpactAnalyzer. Основным назначением ImpactAnalyzer является расчет абсолютных и максимальных значений скоростей, ускорений, напряжений и деформаций, возникающих в горном массиве под действием динамических нагрузок. При выполнении расчетов девиаторы напряжений определяются на основе следующих соотношений:

$$\frac{\partial F}{\partial I_1} = -\frac{\sin \varphi}{3}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial J_2} = \frac{1}{2\sqrt{J_2}} \left\{ \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin(\varphi) \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right\}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \theta} = \sqrt{J_2} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + \sqrt{\frac{J_2}{3}} \sin(\varphi) \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right); \quad (4)$$

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z; \quad J_3 = \sigma_x^d \sigma_y^d \sigma_z^d - \sigma_z^d \tau_{xy}^2; \quad (5)$$

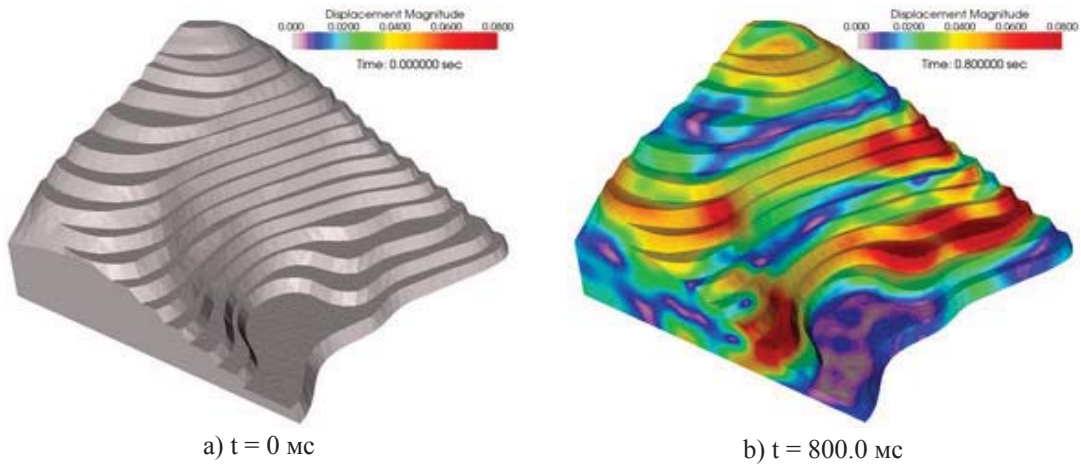


Рис.2. Диаграммы абсолютных смещений под действием сейсмической нагрузки.

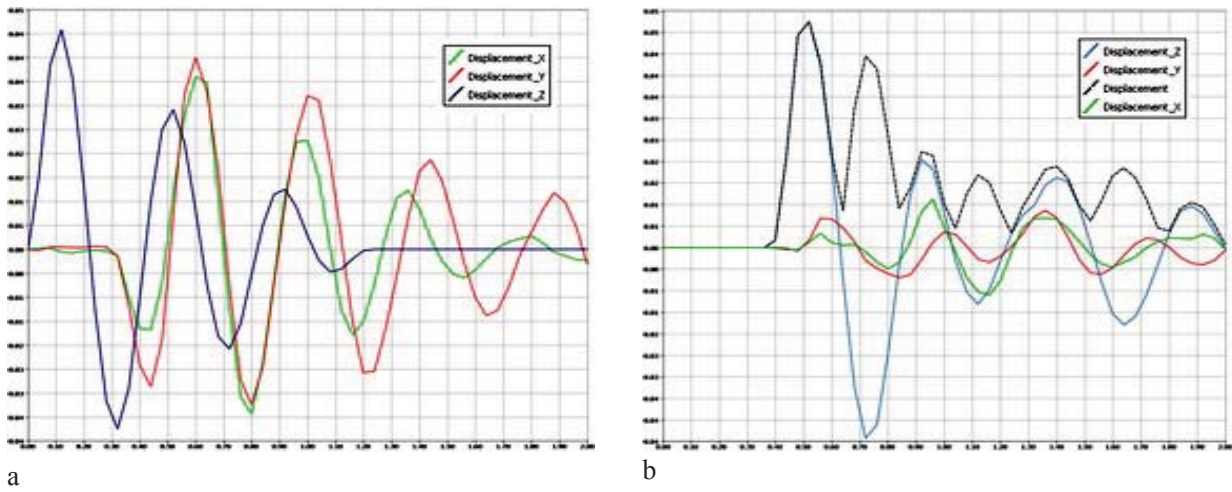


Рис. 3. Графики исходной сейсмической нагрузки (а) на подошву массива и расчетных смещений элемента массива (б) на горизонте 3960-02.

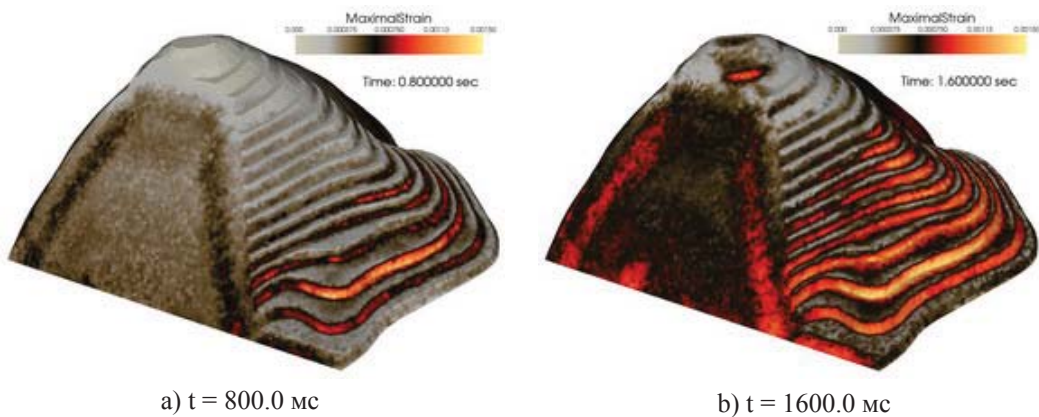


Рис.4. Зоны развития максимальных деформаций в теле массива.

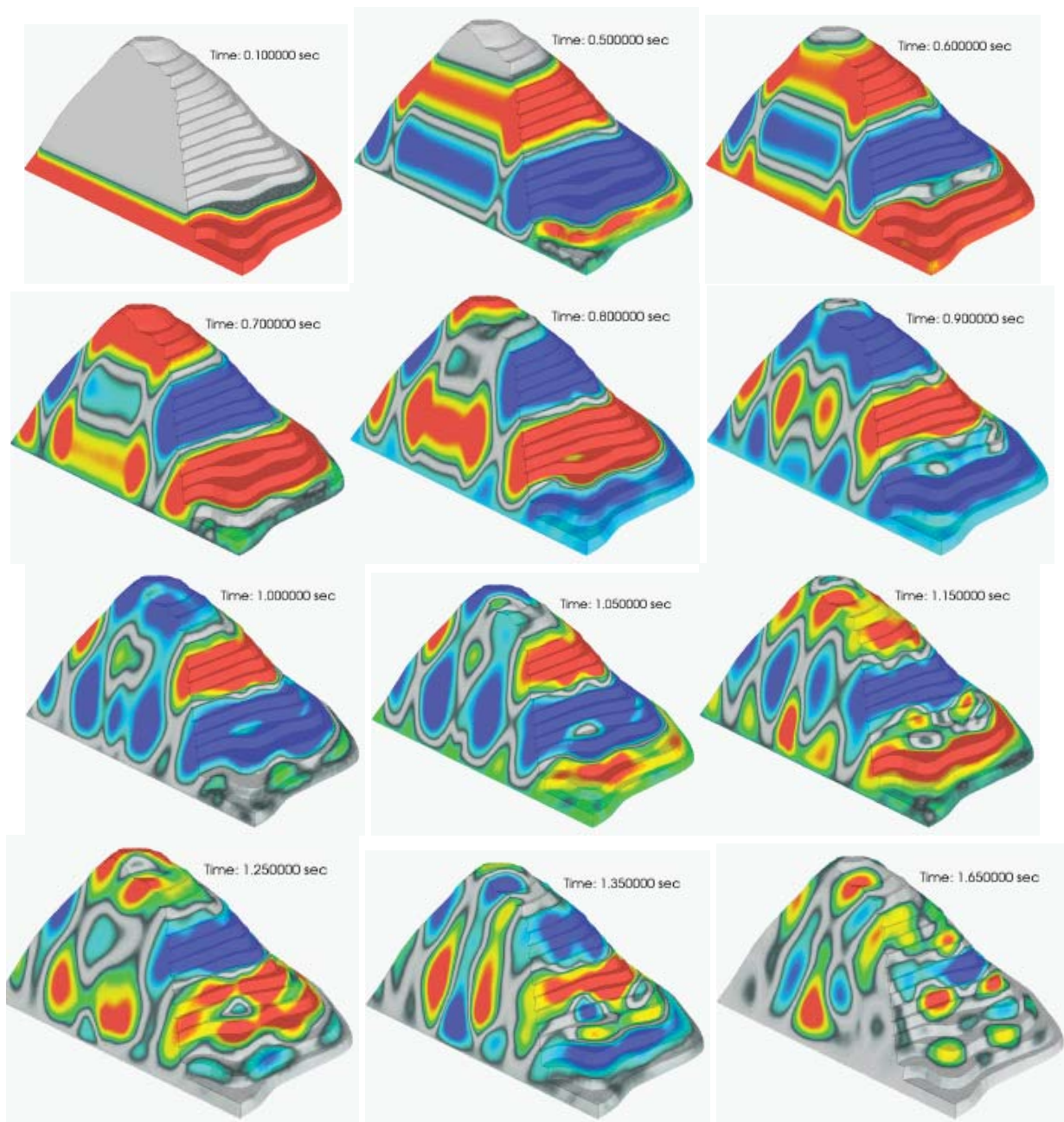


Рис. 5. Распространение сейсмических волн в горном массиве.

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + \tau_{xy}^2, \quad (6)$$

где I_1 – первый инвариант девиатора напряжений; J_2, J_3 – второй и третий инварианты девиатора напряжений; $\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right)$ – угол

Лоде; φ – угол внутреннего трения.

Соотношение между приращением напряжений и приращением деформаций определяется в соответствии с уравнением:

$$\{d\sigma\} = ([C_e] - [C_p]) \{d\varepsilon\}, \quad (7)$$

где $[C_p]$ – матрица пластичности; G – функция пластического потенциала.

Результатами работы программы *ImpactAnalyzer* являются наборы данных, включающих в себя значения расчетных величин для различ-

ных моментов времени. Для обеспечения возможности представления результатов моделирования в виде диаграмм, графиков, сечений и анимационных роликов был разработан модуль *ImpactParaview*.

Основным назначением данного модуля является преобразование выходных файлов, получаемых в результате работы программы *ImpactAnalyzer* в бинарный формат VTU, совместимый с системой визуализации ParaView.

На рис. 5 представлено распространение сейсмической волны в горном массиве.

Анализ расчетных полей напряжений и деформаций, представленных в наглядном виде (рис. 2–5), позволяет выработать рекомендации по проведению инженерных мероприятий, снижающих степень влияния землетрясений на устойчивость бортов карьеров.