

УДК 519.63

О ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ЭФФЕКТОВ В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ

© 2017 г. А. В. Фаворская^{1,2}, член-корреспондент РАН И. Б. Петров^{1,2, *}

Поступило 13.02.2017 г.

Рассматривается исследование пространственных динамических волновых эффектов, возникающих в скальных породах. Рассмотрены наличие ущелья и карстовых пустот. Проведены анализ влияния типа взрыва на пространственные динамические волновые картины и на сейсмограммы в случае горизонтальной и вертикальной линий приёма, анализ влияния удаления карстовой пустоты от ущелья на пространственные динамические волновые картины и сейсмограммы в случае горизонтальной и вертикальной линий приёма. Использовались сеточно-характеристический метод и полноволновое моделирование совместно линейно-упругих и акустических волн.

DOI: 10.7868/S0869565217040041

Данная работа посвящена исследованию пространственных динамических волновых процессов и сейсмограмм, возникающих при решении задачи о распространении сейсмических и(или) акустических волн от источника взрыва в скальных массивах.

Для численного моделирования механики горных пород в основном используют [1] метод дискретного элемента, его разновидность – разрывный метод анализа деформаций и метод связанных частиц. В работе [2] была разработана простая жёстко-блочная модель для анализа устойчивости каверн и тоннелей в окружающих скальных массивах. В работе [3] программный комплекс DYNA2D (метод конечных элементов) применялся для моделирования сейсмического отклика от туннеля в окружающем горном массиве. В работе [4] для моделирования распространения сейсмических волн в кавернах и окружающем горном массиве использовались метод конечных элементов и жёстко-блочная модель.

В данной работе исследование было выполнено путём полноволнового моделирования, т.е. путём совместного решения системы уравнений, описывающей поведение бесконечно-малого объёма изотропной линейно-упругой среды, и системы уравнений, описывающей акустические прост-

ранственные динамические волновые процессы [5] с использованием сеточно-характеристического метода [6–10], который позволяет проводить полноволновое моделирование в гетерогенных средах, учитывать контактные и граничные условия, в том числе контактное условие на границах между линейно-упругой и акустической средами [5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривалась система (рис. 1), состоящая из ущелья, скальных пород вокруг него, воздушного пространства внутри него и над скальными породами и карстовой пустоты [11, 14] размером $150 \text{ м} \times 5 \text{ м}$, заполненной воздухом и удалённой от ущелья на варьируемое расстояние d . Расстояние d бралось равным 0 (карстовая полость непосредственно соединялась с ущельем), 200 и 1000 м. Рассматривались три типа взрывов: взрыв по центру ущелья, углублённый в скальные породы (1), взрыв внизу ущелья по центру (2) и взрыв в центре ущелья (3). Радиус возмущаемой области брался равным 2,5 м. Взрыв моделировался в виде импульса, представляющего собой один период синуса. Амплитуда возмущения относительного давления бралась равной 5000 Па. В расчётах использовались скорость звука в воздухе 331 м/с, плотность $1,2754 \text{ кг/м}^3$. Рассматривались скальные породы со следующими характеристиками: скорость продольных волн 3000 м/с, скорость поперечных волн 1500 м/с, плотность 2000 кг/м^3 . Шаг по времени брался равным $0,00008 \text{ с}$, по пространственным координатам $0,25 \text{ м}$, проводилось всего 15000 шагов по времени.

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный Московской обл.

² Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской Академии наук, Москва

*E-mail: petrov@mipt.ru

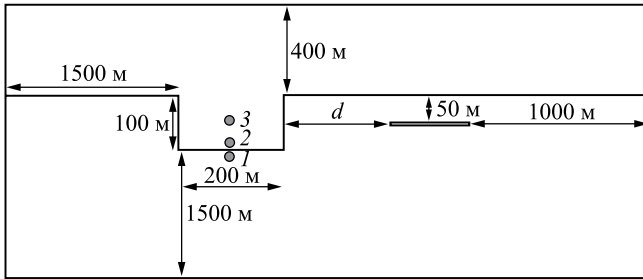


Рис. 1. Постановка задачи.

Для описания пространственных динамических волновых процессов в скальных породах решалась система, описывающая состояние линейно-упругой среды [13, 14]

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v} = (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma})^T, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\sigma} = (\rho c_p^2 - 2\rho c_s^2)(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I} + \rho c_s^2 (\nabla \otimes \mathbf{v} + (\nabla \otimes \mathbf{v})^T). \quad (2)$$

В (1), (2) и далее \mathbf{v} – скорость, $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений Коши, ρ – плотность. В (2) и далее c_p , c_s – скорости продольных и поперечных волн соответственно, $\mathbf{a} \otimes \mathbf{b}$ – тензорное произведение векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} , $(\mathbf{a} \otimes \mathbf{b})^{ij} = a^i b^j$.

В воздухе решалась система, описывающая акустическое поле [15]

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v} = -\nabla p, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} p = -\rho c^2 (\nabla \cdot \mathbf{v}). \quad (4)$$

В (3), (4) и далее p – относительное давление. В (4) и далее c – скорость звука в акустической среде.

На границах между акустической средой и линейно-упругой средой ставилось следующее контактное условие [5]:

$$p = -(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}, \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} - ((\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0, \quad (6)$$

$$\mathbf{v}_A \cdot \mathbf{n} = \mathbf{v}_E \cdot \mathbf{n}. \quad (7)$$

В (5)–(7) \mathbf{n} – вектор нормали, внешней к слою с линейно-упругой средой, в (7) \mathbf{v}_A – скорость в акустическом слое, \mathbf{v}_E – скорость в линейно-упругом слое.

Приёмники, регистрирующие сейсмограммы (сейсотрассы – зависимости скорости от вре-

мени) располагались в карстовой пустоте вблизи границы со скальными породами по двум линиям, вертикальной и горизонтальной. Вертикальная линия приёма состояла из 21 датчика, расположенных через каждые 0,25 м. Горизонтальная линия приёма состояла из 151 датчика, расположенных через каждый 1 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате анализа пространственных динамических волновых полей скорости были выявлены следующие типы волн, характерные для задачи о распространении акустических и сейсмических волн в скальных массивах с ущельями и кавернами от различных типов взрыва. В случае расположения взрыва по центру ущелья и вблизи дна ущелья наблюдаются следующие типы волн:

1) первичные волны в акустической среде ущелья;

2) вторичные волны в упругой среде скальных пород, окружающих ущелье (продольные, поперечные волны, волны Рэлея, волны Лаве, продольные головные волны в упругой среде скальных пород, окружающих ущелье);

3) вторичные волны в акустической среде ущелья;

4) вторичные волны в акустической среде атмосферы над ущельем;

5) вторичные волны в акустической среде внутри карстовых полостей в скальных породах.

В случае расположения взрыва в скальных породах наблюдаются первичные волны в скальных породах и вторичные волны, соответствующие пунктам 3)–5).

По результатам анализа пространственных динамических волновых картин были получены закономерности, характеризующие амплитуды волн поля относительного давления в скальных породах, вызванного сейсмическими и акустическими волнами от взрыва, и поля скорости.

На рис. 2 приведены волновые картины в момент времени 0,36 с в случае удаления карстовой пустоты от ущелья на 200 м. На рис. 2а, 2в нелинейной градацией серого представлены поля модуля скорости, причём белый цвет на рис. 2а соответствует значению, равному или большему, чем 0,1 м/с, а на рис. 2в – 0,0001 м/с. На рис. 2б, 2г представлены поля относительного давления в масштабе от белого до чёрного ± 100 Па. Рис. 2а, 2б соответствуют случаю взрыва в скальных породах, а рис. 2в, 2г – случаю взрыва на дне ущелья.

На рис. 3 представлены сейсмограммы горизонтальной компоненты скорости, полученные с горизонтальной линией приёма, для случая

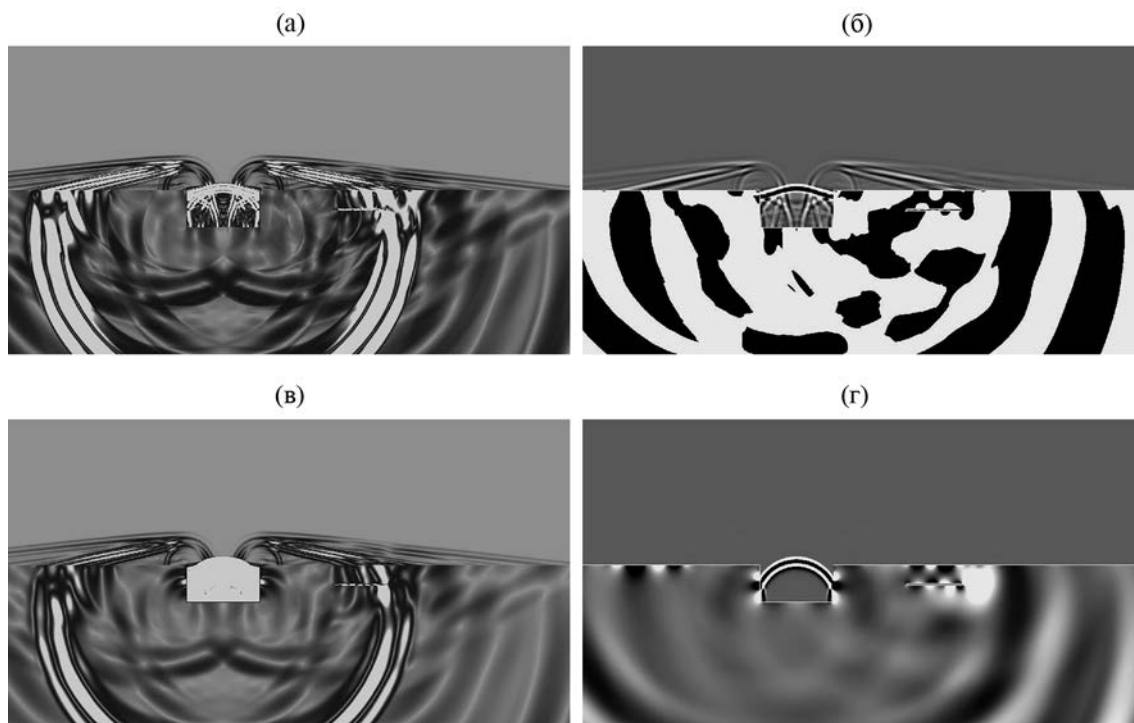


Рис. 2. Волновые картины полей модуля скорости и относительного давления.

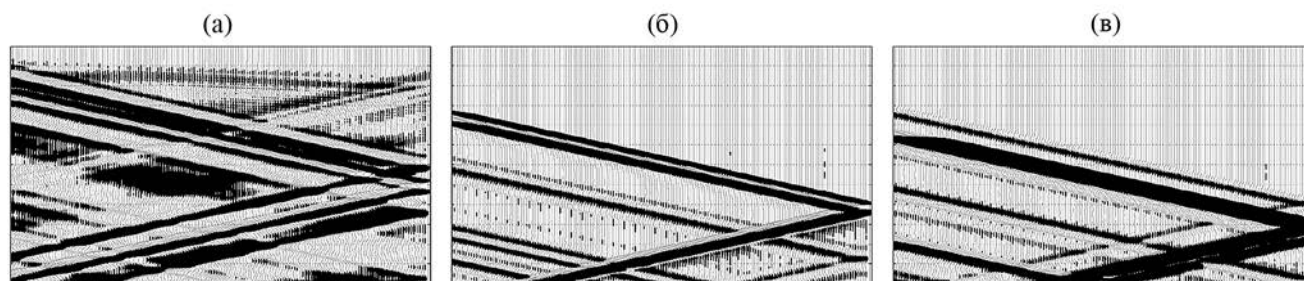


Рис. 3. Сейсмограммы с горизонтальных линий приёма.

карстовой пустоты, смежной с ущельем, и для случаев взрыва в скальных породах (рис. 3а), взрыва на дне ущелья (рис. 3б) и взрыва в центре ущелья (рис. 3в).

Также по результатам анализа сейсмограмм, полученных с вертикальных и горизонтальных линий приёма, можно дополнительно отметить следующие закономерности:

1. Сейсмограммы с горизонтальных линий приёма более информативны, чем сейсмограммы с вертикальных линий приёма.

2. Для комплексного анализа необходимо анализировать как горизонтальную компоненту скорости, так и вертикальную компоненту скорости, несмотря на то, что внутри карстовой пустоты решается система, описывающая распространение акустических волн, т.е. только продольных.

3. Для комплексного анализа необходимо описывать распространение сейсмических волн внутри скальных пород, решая систему уравнений, описывающую состояние линейно-упругой среды, т.е. учитывать все типы волн (в том числе и продольные, и поперечные, и волны Рэлея, и волны Лява, и продольные головные), несмотря на то, что внутри ущелья и карстовой пустоты решается система, описывающая распространение акустических волн, т.е. только продольных.

4. В случае взрыва в скальных породах сейсмические волны доходят до карстовой пустоты раньше, чем в случае взрыва на дне ущелья и по центру ущелья. Несмотря на то, что расстояние в метрах между точкой взрыва в скальных породах и карстовой пустотой больше, чем расстояния в метрах между карстовой пустотой и точками взрыва на дне ущелья и по центру ущелья.

5. В случае взрыва на дне ущелья сейсмические волны доходят до карстовой пустоты раньше, чем в случае взрыва по центру ущелья. Несмотря на то, что расстояние в метрах между точкой взрыва на дне ущелья и карстовой пустотой больше, чем расстояние в метрах между карстовой пустотой и точкой взрыва по центру ущелья.

6. Для случая карстовой пустоты, смежной с ущельем, наибольший вклад вносит горизонтальная компонента скорости для всех типов взрывов.

7. Для случая карстовой пустоты, удалённой от ущелья на 200 м, соотношение между вкладом от горизонтальной компоненты скорости и вертикальной компоненты скорости движется по мере роста удаления в сторону большего вклада от вертикальной компоненты скорости, чем в случае карстовой пустоты, смежной с ущельем.

8. Для случая карстовой пустоты, удалённой от ущелья на 1000 м, соотношение между вкладом от горизонтальной компоненты скорости и вертикальной компоненты скорости ещё больше приближается к единице.

9. В случае взрывов на дне ущелья и по центру ущелья сейсмограммы схожи качественно по рисунку, но сдвинуты на соответствующие моменты времени. Также меняются соотношения амплитуд между горизонтальной и вертикальной компонентами скорости, но с сохранением качественных характеристик рисунка сейсмограмм для каждой из компонент.

10. Сейсмограммы для случая взрыва в скальных породах принципиально отличаются качественными характеристиками рисунка сейсмограмм от случаев взрывов на дне и по центру ущелья. Это обусловлено тем, что пространственные динамические волновые картины для данных случаев качественно отличаются.

11. В случае карстовой пустоты, смежной с ущельем, разница между временем прихода волновых фронтов к краю карстовой пустоты, ближайшей к ущелью, и временем прихода волновых фронтов к краю карстовой пустоты, дальней от ущелья, минимальна для случая взрыва в скальных породах.

12. Во всех случаях наибольший вклад вносят отклики, образующиеся внутри карстовых пустот, от поперечных волн в скальных породах, падающих на соответствующую границу раздела. Затем происходят переотражения данных волн внутри карстовой пустоты между верхней и нижней стенками, которые замазывают вклад от остальных типов волн.

13. Вклад от продольных волн в скальных породах минимален, что связано с пространствен-

ной формой соответствующих волновых фронтов и расположением карстовых пустот вблизи дневной поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа пространственных динамических волновых полей скорости и относительного давления были выявлены характерные типы волн и закономерности, связывающие соотношения амплитуд соответствующих полей относительного давления и скорости в зависимости от типа взрыва и удаления карстовой полости от ущелья. Также по результатам анализа сейсмограмм, полученных с вертикальных и горизонтальных линий приёма, были дополнительно отмечены характерные закономерности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 14–11–00263.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bobet A., Fakhimi A., Johnson S., Morris J., Tonon F., Yeung M.R.* Numerical Models in Discontinuous Media: Review of Advances for Rock Mechanics Applications // *J. Geotechn. and Geoenviron. Eng.* 2009. V. 135. № 11. P. 1547–1561.
2. *Belytschko T., Plesha M., Dowding C.H.* A Computer Method for Stability Analysis of Caverns in Jointed Rock // *Intern. J. Numer. and Anal. Methods Geomech.* 1984. V. 8. № 5. P. 473–492.
3. *Schwer L.E., Lindberg H.E.* A Finite Element Slide-line Approach for Calculating Tunnel Response in Jointed Rock // *Intern. J. Numer. and Anal. Methods Geomech.* 1992. V. 16. № 7. P. 529–540.
4. *Dowding C.H., Belytschko T.B., Yen H.J.* A Coupled finite Element–Rigid Block Method for Transient Analysis of Rock Caverns // *Intern. J. Numer. and Anal. Methods Geomech.* 1983. V. 7. № 1. P. 117–127.
5. *Фаворская А.В., Петров И.Б.* // *ДАН.* 2016. Т. 466. № 6. С. 722–725.
6. *Петров И.Б., Фаворская А.В., Муратов М.В., Бирюков В.А., Санников А.В.* // *ДАН.* 2014. Т. 459. № 4. С. 406–408.
7. *Favorskaya A.V., Petrov I.B., Sannikov A.V., Kvasov I.E.* Grid Characteristic Method Using High Order Interpolation on Tetrahedral Hierarchical Meshes with a Multiple Time Step. // *Math. Models and Comput. Simulations.* 2013. V. 5. № 5. P. 409–415.
8. *Golubev V.I., Petrov I.B., Khokhlov N.I.* Numerical Simulation of Seismic Activity by the Grid-Characteristic Method // *Comput. Math. and Math. Phys.* 2013. V. 53. № 10. P. 1523–1533.

9. Магомедов К.М., Холодов А.С. Сеточно-характеристические численные методы. М.: Наука, 1988. 287 с.
10. Иванов В.Д., Кондауров В.И., Петров И.Б., Холодов А.С. Расчет динамического деформирования и разрушения упругопластических тел сеточно-характеристическими методами // Мат. моделирование. 1990. Т. 2. № 11. С. 10–29.
11. Friend S. Sinkholes. N.Y.: Pineapple Press, 2002.
12. Neuendorf K.K.E. Glossary of Geology. В.: Springer Sci. / Business Media, 2005.
13. Новацкий В.К. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
14. LeVeque R. Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002.
15. Landau L.D., Lifshitz E.M. Fluid Mechanics. (Vol. 6. A Course of Theoretical Physics). Oxford: Pergamon Press, 1959.