

## Теоретические и экспериментальные основы оценки состояния сводовой части транспортных тоннелей с использованием метода акустической резонансной дефектоскопии

М.Д. Молев<sup>2</sup>, М.С. Плешко<sup>1</sup>, А.А. Насонов<sup>3</sup>, М. Алаши<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения

<sup>2</sup>Донской государственный технический университет

<sup>3</sup>Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова

**Аннотация:** в статье изложены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований в области неразрушающего контроля и прогнозирования геомеханического состояния сводовой части транспортных тоннелей. Показано, что для указанной цели можно применить метод акустической резонансной дефектоскопии. Методика шахтных измерений состояла в фиксации вынужденных колебаний многослойного углепородного массива при ударном инициировании в нем сейсмоакустического сигнала. Возбуждение и приём акустических стоячих волн осуществлялись в нижнем породном слое. Фактические характеристики эффективности акустической оценки состояния геосреды предоставляют авторам возможность рекомендовать изложенную методику для массового практического применения при проведении транспортных тоннелей.

**Ключевые слова:** геомеханическое состояние, геологическая среда, массив, оценка, сводовая часть, транспортный тоннель, спектр, акустическая резонансная дефектоскопия, прогноз, контроль, прогноз, ослабленный механический контакт.

Большой научный и практический интерес для специалистов в сфере строительства транспортных тоннелей представляет оценка геомеханического состояния массива пород в их сводовой части. Как показывает практика горных работ в шахтах и метро, достоверная информация о геологической среде в районе строительства позволяет выбрать оптимальные параметры элементов крепления выработок.

Существующие геологические методы контроля не позволяют с достаточной степенью достоверности решить указанную проблему, а бурение разведочных шпуров и скважин является весьма затратным технологическим производственным процессом.

В настоящее время для прогнозирования сплошности геологической среды довольно широко и успешно применяются геофизические методы, основанные на различии в физических параметрах объектов массива горных

пород. Их преимуществами перед другими методами прогнозирования являются: высокая достоверность результатов (до 92%), производительность работ, сравнительно низкие финансовые расходы на выполнение шахтных исследований [1].

Результаты внедрения геофизической оценки строения массива на угольных и рудных месторождениях, а также установленные опытным путем тесные корреляционные зависимости между физико-механическими параметрами углепородной среды и фиксируемыми текущими значениями геофизического поля дают возможность правомерно применять подземные сейсмоакустические методы и технологии в целях прогнозирования состояния горного массива при строительстве тоннелей [2].

Геофизические работы по оценке геомеханического состояния сводовой части тоннелей предлагается осуществлять методами спектральной геоакустики. Основная роль отводится акустической резонансной дефектоскопии (АРД), которая с необходимой и достаточной надежностью для обоснования и разработки технологии проведения выработок позволяет определить пространственное расположение породных слоёв.

Анализ и обобщение результатов изучения физико-механических свойств горных пород в свободном состоянии и массиве позволил сделать ряд выводов, которые были положены в основу физико-математической теории контроля состояния геологической среды с использованием метода акустической дефектоскопии. Исходным положением является фундаментальный тезис геофизики, заключающийся в том, что реакция (отклик) горной породы на искусственно генерируемый сигнал зависит от частоты сигнала, физических и механических свойств слагающих элементов: плотности, пористости, напряженного состояния, акустического и электрического сопротивления, влагонасыщенности. В процессе прохождения по комплексу пород, слагающих массив, акустический сигнал

---

изменяет свою форму в соответствии со свойствами пород, а также качеством механического контакта между породными слоями и их геометрическими размерами.

Геологическая среда в пределах Ростовской области сложена следующими породами: аргиллитами, сланцевыми прослоями (глинистых и песчаных фракций), алевролитами и песчаниками. Перечисленные горные породы имеют довольно высокую плотность (средняя величина составляет  $2,7 \text{ г/см}^3$ ), прочность (до 115 МПа), относительно низкую водонасыщенность (в среднем 0,4 %) и пористость (3,4 %). При этом наблюдается существенный разброс параметров пород в горизонтальном и вертикальном направлениях.

В рамках разработки методики спектральных исследований авторы опирались на результаты исследований специалистов в области геомеханики, которые изложены в специальной литературе [3]. Согласно указанным сведениям были измерены на прессах института ВНИМИ прочностные и физико-технические параметры горных пород: пределы прочности на растяжение и сжатие, и крепости. В соответствии с принятой литологической классификацией породные образцы составили приблизительно равные выборки: 114 штук – глинистые сланцы, 116 – песчаные сланцы, 120 – алевролиты. Объём группы песчано-глинистого литотипа включал тридцать образцов.

На основе полученных результатов были сделаны выводы, имеющие определяющее значение при комплексной оценке электрических и акустических характеристик литологических разностей для формулирования уравнений связи прочностных и физических параметров в конкретных условиях геологической среды. Показатель прочности на сжатие в направлении, перпендикулярном слоям горных пород составил  $\sigma_{сж} = 10 - 170$  МПа. Для конкретной горной породы значения прочности занимают на числовой оси свой определённый отрезок. Минимальной величиной

---

обладают глинистые и песчано-глинистые литотипы ( $\sigma_{сж} = 10 - 90$  МПа), а большая часть значений находится в интервале от 30 до 70 МПа. Прочность сланцевых фаций характеризуется величинами 30 - 110 МПа (преимущественно 50 - 90 МПа). Максимальные значения имеют алевролиты – 70-170 МПа, при этом подавляющая часть испытанных проб (92 штуки) имеет прочность 91 - 170 МПа. Прочностные характеристики образцов литотипов, исследованных на растяжение, располагаются в порядке аналогично  $\sigma_{сж}$  – меньшие значения пределов прочности принадлежат группам глинистых и песчано-глинистых фаций (от 1 до 3 МПа), среднее положение (в районе 4-6 МПа) занимают образцы песчаных сланцев, максимальные величины от 6 до 9 МПа принадлежат алевролитам.

При имеющемся существенном разбросе значений прочностных параметров однотипных фаций по различным регионам достаточно чётко просматривается тенденция, заключающаяся в том, что пределы прочности проб одних и тех же литотипов, взятых в нормальной геологической среде (без нарушений сплошности) и в нарушенных участках, отличаются на десятки процентов. Так параметр  $\sigma_{сж}$  образца из нарушенного массива имеет значение в среднем на 37 % меньше по сравнению с аналогичной пробой, отобранной в эталонной зоне.

С позиций геомеханики снижение значений прочностных характеристик литотипов, расположенных в нарушенной зоне, можно объяснить способностью горных пород деформироваться под воздействием тектонических процессов. При приложении нагружения изменяются структурные и текстурные характеристики фаций, а также возрастает трещиноватость. Классическая теория геоакустики утверждает, что скоростные и динамические характеристики упругих колебаний зависят от прочностных параметров горных пород и однозначно оцениваются соответствующими модулями упругости, входящими в так называемое

---

волновое уравнение. Приведённые результаты натуральных экспериментов дают возможность уяснить условия возникновения и распространения сейсмосигнала в геологической среде.

Из практики известно, что устойчивость «кровли» выработки, т.е. сводовой части тоннеля, определяется геомеханическими и геометрическими характеристиками породных слоев, образующих горный массив: степенью расслоения, пространственным положением в геосреде плоскостей механического ослабления (ПМО) и величиной коэффициента механического сцепления между соседними породными слоями. Реальное расслоение горного массива наблюдается преимущественно по ПМО, а не между поверхностями, ограничивающими распространение на данном участке геологических литотипов.

Идентификация физических причин, определяющих разделение горных пород на слои по плоскостям механического ослабления и распространения сейсмосигнала в геосреде при изучении её геоакустическим спектральным методом (АРД) дало возможность авторам статьи построить модель, которую вполне обоснованно предлагается использовать при интерпретации результатов исследований.

Интерпретационная модель геологической среды, названная нами вертикально-градиентной физико-геомеханической моделью (ВГФГМ), представляет по своей сути аппроксимацию части массива пород «кровли», в которой распространяется сейсмосигнал. Основой применения метода АРД является установленная опытным путём тесная корреляция между спектральной характеристикой отклика геосреды и толщиной породного слоя с учетом качества сцепления по плоскостям расслоения [4]. Определение положения ПМО по вертикали осуществляется, исходя из величины суммарную толщины породных слоёв, заключённых между обнажением свода тоннеля и границей расслоения, которую необходимо найти. Вариация

---

мощности слоёв, которая однозначно определяет частоты резонансных колебаний  $f_{рез}$ , имеет вертикальный вектор (вертикальная ось симметрии выработки). Анализ фактических материалов подземных измерений позволил оценить величину так называемой активной зоны горного массива геосреды над выработкой  $h$ , равную примерно 20 метрам [5].

С учетом этих данных был произведён представительный объем экспериментальных исследований, в процессе которых были изучены условия и физические характеристики распространения акустических колебаний в породах кровли и почвы тоннеля по вертикали к напластованию.

При возбуждении импульсных сигналов в массиве на поверхности ПМО ( в пограничной зоне между породными прослоями) формируются так называемые вынужденные «толщинные» колебания. Амплитуда возникших собственных акустических колебаний отклика породной структуры в случае присутствия плоскости ослабления существенно (в несколько раз) превысит амплитуду отклика в нормальных условиях, т.е. в отсутствии ПМО.

Методика проведения эксперимента состояла в периодической аппаратурной записи вынужденных колебаний горного массива, представляющего в первом приближении слоистую плоскопараллельную структуру, при ударном инициировании сейсмических акустического сигналов. Возбуждение и регистрация геоакустических импульсов осуществлялись в нижнем породном слое. Расстояние между пунктами возбуждения и регистрации сигнала составляло 1 - 5 м. Запись сигнала осуществлялась на записывающее устройство (рис. 1).

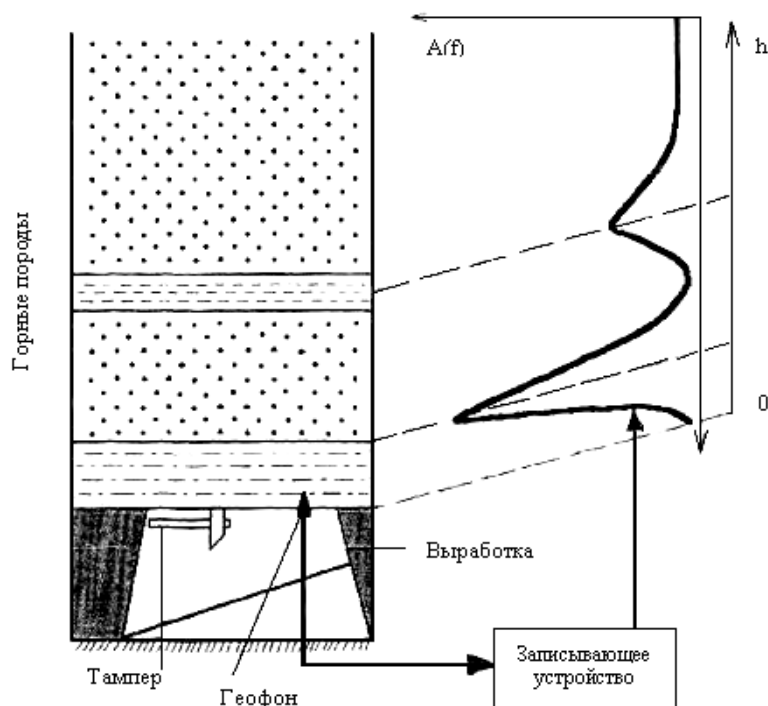


Рис. 1 – Схема проведения испытаний

Обработка полученных сейсмограмм выполнялись на персональном компьютере. Типовые экспериментальные записи откликов горного массива содержат последовательность резонансных экстремумов в виде максимальных значений амплитуд, которые, согласно теории геоакустики, обусловлены наличием в геологической среде расслоений по плоскостям механического ослабления. Расстояние от сводовой части выработки до нижней границы искомого породного прослоя однозначно определяет резонансную частоту  $f_{рез}$ , а значение максимума амплитуды позволяет оценить качество сцепления между слоями. Сопоставительный анализ результатов исследований методом АРД и характеристик геологических разрезов по эталонным шпурам подтвердил правильность выдвинутых предположений. Было установлено, что регистрируемый сигнал стабильно определяется физико-механическим состоянием геологической среды в пункте измерений точке и изменяет свою амплитудно-частотную



характеристику в соответствии с вариацией геометрии породных слоев и качества ПМО.

Величина расстояния от свода выработки до границы  $K$ -того породного слоя вычисляется по формуле

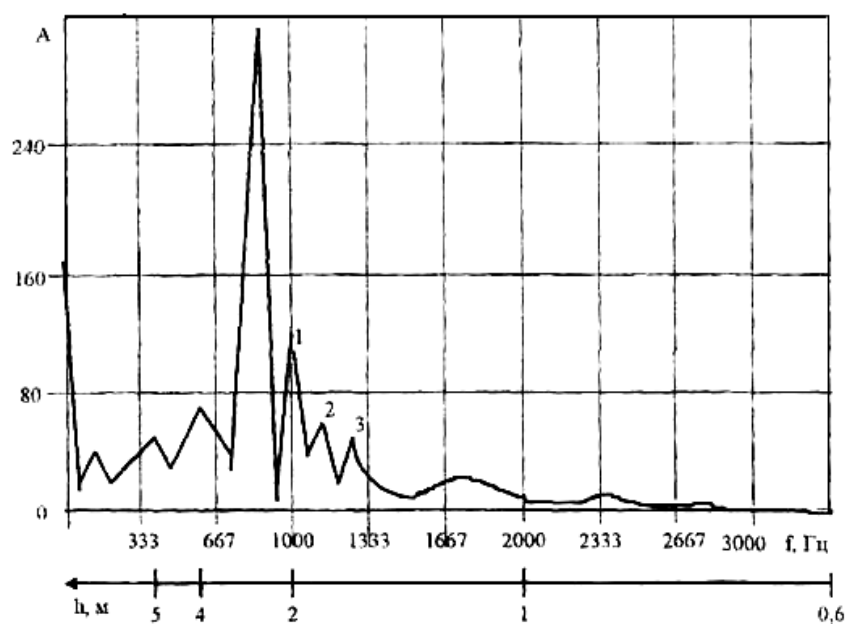
$$h = \frac{V}{2f},$$

где  $V$  – средняя скорость распространения упругих колебаний в геосреде по вертикали, м/с;  $f$  – резонансная частота вынужденных колебаний, Гц.

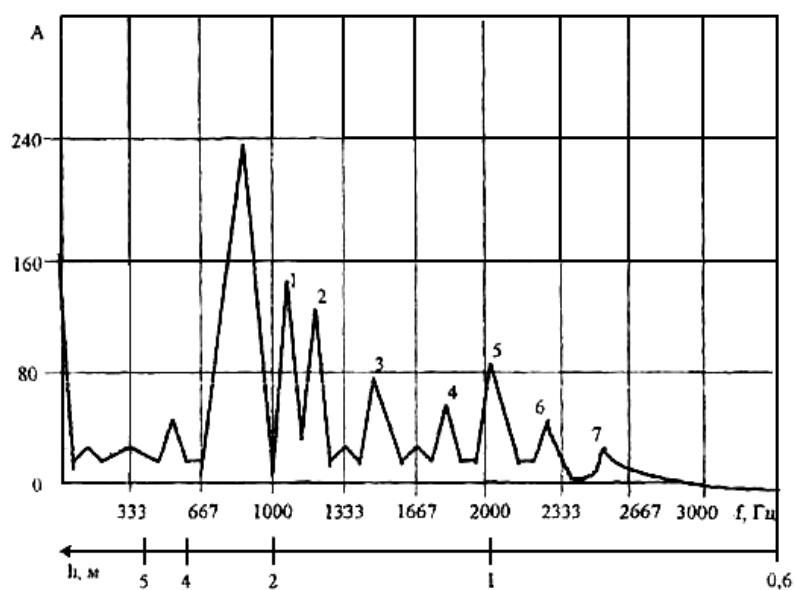
Скорость по различным участкам составляет 4000 - 5000 м/с. Амплитуда спектральных составляющих сейсмосигнала обратно пропорциональна качеству механического сцепления между породными прослоями.

Экспериментальные исследования волновой картины подтвердили следующие выводы по результатам модельных исследований и теоретических изысканий: относительно формы сейсмограмм, регрессионных связей между резонансными частотами и толщиной породных слоев, взаимосвязи между амплитудами спектральных составляющих сейсмосигнала и качеством сцепления пород по плоскостям ПМО. При этом была проведена классификация спектрограмм в соответствии с характеристикой кровли тоннеля. При наличии устойчивой непосредственной «кровли» горной выработки высокочастотная область сейсмограммы имеет резонансные максимумы в количестве от двух до трёх единиц, в противном случае (неустойчивое состояние) – 5-6. Основная вышележащая часть массива, тяжёлая по нагрузочным свойствам, не имеет расслоений и характеризуется отсутствием спектральных составляющих в низкочастотном интервале (рис. 2).





а)



б)

Рис. 2 – Типовые экспериментальные сейсмограммы для основных типов «кровли» тоннеля: а – для устойчивой непосредственной «кровли»; б – для неустойчивой непосредственной «кровли»; 1,2,3, ... n – резонансные экстремумы.

Практическим подтверждением научной обоснованности и эффективности рекомендаций, изложенных в данной статье, служат

результаты испытаний методики в шахтных условиях. Экспериментальные работы по оценке физико-механического состояния пород кровли горных выработок с привлечением метода АРД проводились в течение двадцати пяти лет на шахтах Донбасса. Объем испытаний составил 137 профилей в различных горных выработках, которыми охватываются все типичные горно-геологические условия. Сопоставление прогнозных данных с результатами каротажа скважин, разведочного бурения и другими фактическими материалами горных работ позволило:

- а) оценить возможность практической реализации теоретических разработок;
- б) разработать методику шахтных измерений;
- в) определить количественные критерии оценки состояния пород.

По результатам испытаний геоакустический спектральный метод оценки физико-механического состояния пород кровли характеризуется следующими показателями:

- а) надёжностью определения количества поверхностей ОМК – 90 %;
- б) дальностью исследований (по вертикальной оси) – 15 - 20 м;
- в) разрешающей способностью (минимальным расстоянием между двумя соседними плоскостями) – 0,2 м;
- г) погрешностью определения расстояния до ОМК – 10 %;
- д) надёжностью прогнозирования состояния кровли по критерию устойчивости - 90 %.

Полученные технико-экономические показатели геофизического прогнозирования строения пород кровли при проведении подготовительных горных выработок на шахтах Донбасса с учетом анализа конкретных горно-геологических условий позволяют рекомендовать описанные подземные геофизические методы для широкого промышленного использования при

---

проведении транспортных тоннелей, что в настоящее время является весьма актуальным [6-12].

### Литература

1. Молев М.Д. Геофизическое прогнозирование горно-геологических условий подземной разработки угольных пластов. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2000. 184 с.

2. Колос А.Ф., Сидоренко А.А., Соловьев С.В. Особенности напряженного состояния грунтов подплитного основания при безбалластной конструкции верхнего строения пути // Инженерный вестник Дона. 2014. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2443](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2443).

3. Молев М.Д., Бородин Р.А. Лабораторные исследования физико-механических свойств горных пород, слагающих углевмещающий массив Восточного Донбасса // Научно-технические проблемы строительства вертикальных стволов, околоствольных дворов, горизонтальных и наклонных выработок: сб. науч. тр. / АО «Ростовшахтострой», Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. Новочеркасск: ЮРГТУ, 1999. С.101-103.

4. Бауков Ю.Н., Данилов В.Н. Физические основы резонансного метода контроля расслоений кровли горных выработок // Известия вузов. Горный журнал. 1988. № 1. С. 84-87.

5. Молев М.Д. Методология контроля и прогнозирования состояния углепородного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. №3. С. 159-162.

6. Плешко М.С. Анализ напряженного состояния безбалластной конструкции верхнего строения пути и обделки железнодорожного тоннеля // Инженерный вестник Дона. 2015. № 1 (ч. 2). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2831](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2831).

7. Калмыков Б.Ю., Высоцкий И.Ю., Овчинников Н.А. Предложения по оценке прочности конструкции пассажирских транспортных средств // Инженерный вестник Дона. 2012. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/765.

8. Прокопов А.Ю., Прокопова М.В., Ротенберг М.А. Математическое моделирование взаимовлияния автодорожного тоннельного комплекса №6-ба и действующего железнодорожного тоннеля №5 в г. Сочи // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. ОВ № 7. Освоение подземного пространства мегаполисов. – С. 101 - 109.

9. Гергарт Ю.А. Методика испытания горных пород на прочность неразрушающим методом при проходке транспортных тоннелей // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2118.

10. Странченко С.Г., Плешко М.С., Армейсков В.Н. О необходимости проведения комплексного мониторинга подземных объектов на различных стадиях жизненного цикла // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994.

11. Jing, L. A review of techniques advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, no 40, pp. 283 - 353.

12. Pleshko M.S., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A., Pashkova O.V. Study of technical solutions to strengthen the lining of the barrel in the zone of influence of construction near-wellbore production // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. VOL. 10. NO. 1, JANUARY 2015. Pp. 14-19.

### References

1. Molev M.D. Geofizicheskoe prognozirovanie gorno-geologicheskikh uslovij podzemnoj razrabotki ugol'nyh plastov [Geophysical forecasting geological

---

- conditions of underground mining of coal seams]. Juzh.-Ros. gos. tehn. un-t. – Novocherkassk: JuRGU (NPI), 2000. 184 p.
2. Kolos A.F., Sidorenko A.A., Solov'ev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2443](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2443).
3. Molev M.D., Borodin R.A. Laboratornye issledovaniya fiziko-mehaničeskikh svojstv gornyh porod, slagajushhih uglevmeshhajushhij massiv Vostochnogo Donbassa. Nauchno-tehnicheskie problemy stroitel'stva vertikal'nyh stvolov, okolostvol'nyh dvorov, gorizontaľnyh i naklonnyh vyrabotok: sb. nauch. tr. AO «Rostovshahtostroj», Juzh.-Ros. gos. tehn. un-t. Novocherkassk: JuRGU, 1999. Pp. 101-103.
4. Baukov Ju.N., Danilov V.N. Gornyj zhurnal. 1988. № 1. pp. 84-87.
5. Molev M.D. Gornyj informacionno-analiticheskiy bjulleten'. 2007. №3. pp. 159-162.
6. Pleshko M.S. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015. № 1 (ch. 2). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2831>.
7. Kalmykov B.Ju., Vysockij I.Ju., Ovchinnikov N.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012. № 2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/765>.
8. Prokopov A.Ju., Prokopova M.V., Rotenberg M.A. Gornyj informacionno-analiticheskiy bjulleten'. 2013. OV № 7. Osvoenie podzemnogo prostranstva megapolisov. pp. 101 - 109.
9. Gergart Ju.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013. № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2118>.
10. Stradanchenko S.G., Pleshko M.S., Armejskov V.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2013. № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1994>.
11. Jing, L. A review of techniques advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, no 40, pp. 283 - 353.
-



12.Pleshko M.S., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A., Pashkova O.V. Study of technical solutions to strengthen the lining of the barrel in the zone of influence of construction near-wellbore production. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. VOL. 10. NO. 1, JANUARY 2015. Pp. 14-19.