

С.В.ЦИРЕЛЬ, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, tsirel58@mail.ru
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

S.V.TSIREL, Dr. in eng. sc., chief research assistant, tsirel58@mail.ru
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ДИЛАТАНСИЯ В РАЗРУШЕННЫХ ПОРОДАХ

Предложена методика расчета дилатационных изменений объема разрушенных пород. С помощью методики рассмотрено разуплотнение взорванных пород, поведение разрушенных горной массы при сжатии и вибрации, а также сделаны некоторые качественные оценки процессов, происходящих в зонах разрушения в горных массивах при подвижках.

Ключевые слова: дилатансия, разрушенные породы, гранулометрический состав, сдвиг, разрыхление, взрывание, сжатие, вибрация.

PHENOMENON OF DILATANCY IN FRAGMENTED ROCKS

The design procedure of dilatancy changes of volume of the fragmented rocks is offered. By means of this technique the mechanism of loosening in rock blasting is considered. The behaviour of fragmented rocks at compression and vibration is studied. Quality estimations of the processes occurring in zones of destruction in rock massif at shift are made.

Key words: dilatancy, fragmented rocks, particle size distribution, shear, loosening, blasting, compression, vibration.

Для динамических процессов в горном массиве как естественной, так и техногенной природы важное значение имеют изменения объема подвергшейся разрушению породы. При взрывном разрушении механизмы различаются для разных областей разрушенной горной массы: для близких к свободным поверхностям слоев основную роль играют осыпание, разлет и растяжение, для глубинных слоев – сжатие, растяжение и дилатансия. При этом дилатансия может приводить к наибольшим изменениям объема, так как они связаны не со сжимаемостью блоков породы, а с их переупаковкой (в широком смысле слова). Сходной характер имеет разуплотнение и при обрушении горной массы.

В 90-е годы дилатансии уделялось большое внимание исследователей. В наибольшей мере были изучены три вида дилатационных процессов: дилатационное разуплотнение не потерявшей сплошности среды за счет образования микротрещин [5,

11]; изменения плотности модельной среды, состоящей из шаровых или кубических элементов [8, 17]; увеличение объема массива при подвижке (проскальзывании) по единичной шероховатой трещине [3, 19]. Менее всего изучен именно тот вид дилатансии, который был впервые обнаружен О.Рейнольдсом [16], – изменения плотности сыпучей (разрушенной) среды, состоящей из элементов неправильных форм, при сдвиговой деформации. Основное отличие этого вида дилатансии от проскальзывания по трещине заключается в подвижках по множеству поверхностей, иначе говоря, во всем объеме деформируемой породы. Немногие исследования этого процесса рассматривают деформирование среды, состоящей из кусков одного размера или, максимум, двух-трех размеров [2, 6, 7, 9, 12, 15], в то время как и окончательная плотность и процесс существенно зависят от гранулометрического состава [14, 18]. Настоящая работа призвана заполнить этот пробел.

Для исследования влияния гранулометрического состава на скорость дилатансии рассмотрим простой сдвиг разбитой трещинами, но не смещенной породы (рис.1). При малых сдвигах куски находятся в зацеплении друг с другом, и дилатационное разуплотнение имеет примерно такой же характер, как у породы, разрушающейся при неравномерном нагружении. Для описания этого этапа разрыхления использовались данные работы [11]. После начала выхода блоков из зацепления ($\xi \approx 0,01-0,02$) между ними появляются трещины, в которые сперва могут попасть только самые мелкие обломки, с увеличением размеров зазоров они становятся доступны для более крупных блоков и т.д. При больших сдвигах все фрагменты, кроме крайних фракций, понемногу заполняют щели между более крупными и сами образуют щели для более мелких. Размер щелей в первую очередь определяется величиной угла сдвига ξ , гранулометрическим составом разрушенной массы $F(x)$, распределением углов α , под которыми смещаются куски при сдвиге. Схематично этот процесс показан на рис.2.

В основу расчета процесса дилатационного разуплотнения положен метод определения плотности сыпучих и разрушенных материалов [14, 18]. Как показано в работе [18], основными величинами, от которых зависит плотность, являются показатель однородности гранулометрического соста-

$$n = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{x}{F} \left(\frac{dF}{dx} \right)^2 dx \quad (\text{для монофракции})$$

$n \rightarrow \infty$, по мере увеличения степени дробления n убывает), качество смешения фракций $0 < p < 1$ (для раздробленных пород p в среднем равно 0,7-0,75) и степень разуплотнения монофракции $K_p^0 = V/V_0$ (для полностью разрыхленной среды из неокатанных кусков $K_p^0 = 1,8-2,1$ в зависимости от формы кусков). В данном случае K_p^0 заменяется на серию величин $1 \leq K_p^{\alpha_i} \leq K_p^0$, причем совокупности с различными значениями $K_p^{\alpha_i}$ перемешаны между собой (для квадратов на рис.2 $\alpha_i = \pi/4$).

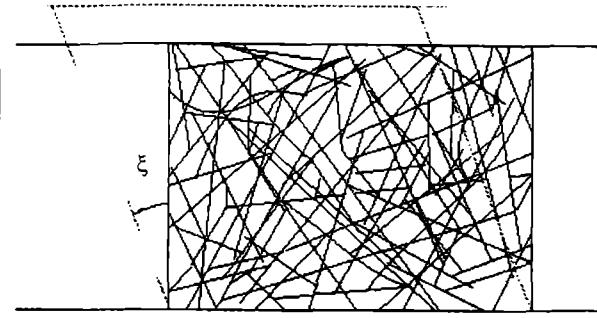


Рис.1. Изменение объема при сдвиге разрушенной породы

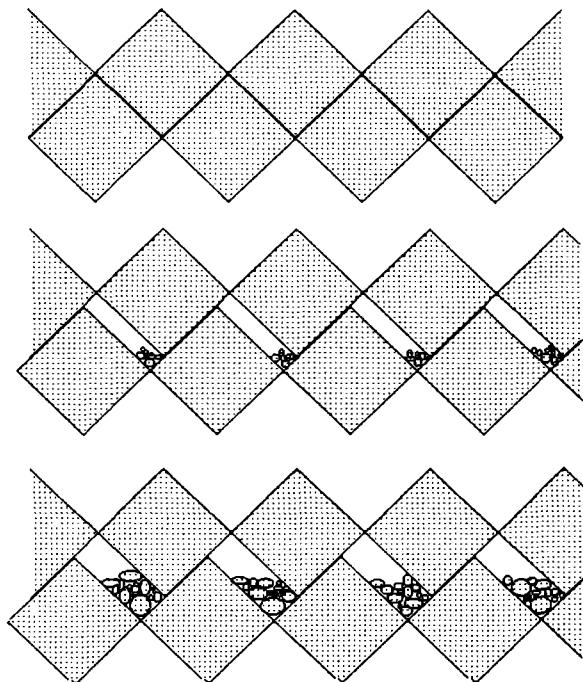


Рис.2. Схема дилатационного разуплотнения

Примеры построенных этим методом дилатационных кривых для реальных гранулометрических составов разрушенной породы приведены на рис.3. Ход кривой разуплотнения $\epsilon(\xi)$ при равномерном распределении углов сдвига α_i существенно зависит от содержания мелких фракций. Если содержание мелких фракций не слишком велико, то кривая имеет участок резкого возрастания объема при $\xi = 0,02-0,1$, а при дальнейшем увеличении сдвига скорость дилатансии Λ заметно убывает и продолжает плавно сокращаться. Если содержание мелких фракций очень велико, то изменения Λ носят более плавный, но и более сложный характер. Суть этих различий заключается в

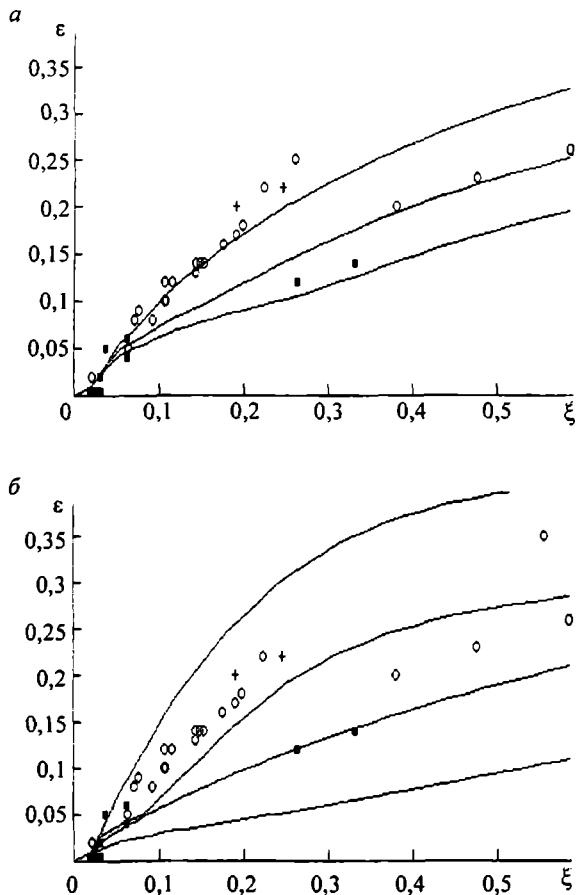


Рис.3. Примеры дилатансионных кривых:
а – при равновероятном распределении углов сдвига;
б – при наличии преимущественных углов; точками показаны экспериментальные данные [1]

том, что самые мелкие кусочки могут попасть даже в очень узкие щели, образовавшиеся на ранних стадиях сдвига, соответственно, если их количество велико, то это сдерживает рост объема. Дальнейший ход кривой $\varepsilon(\xi)$ зависит от значения n . Если n достаточно велико (мало кусков средних размеров), то на определенных стадиях сдвига не хватает кусков, способных попасть в доступные для них пустоты, и объемная деформация заметно увеличивается. Второй фактор, от которого зависит дилатансионное разуплотнение, – это преобладающее направление трещин и углов сдвига α (рис.3, б). При преобладании больших α дилатансионная кривая близка к дилатансионным кривым у совокупностей с малым содержанием мелких фракций; преобладание малых α влияет на дилатансионную

кривую примерно также, как высокое содержание мелких фракций.

Данный метод расчета дилатансионной кривых позволяет установить механизмы разрыхления при взрывных работах. Согласно В.В.Ржевскому [10], разрушенные породы в развале делятся по степени связности на три категории: I – сыпучие разрушенные породы (образуют четко выраженные откосы, $K_p = 1,4-1,65$); II – связно-сыпучие разрушенные породы (не образуют четко выраженных откосов, $K_p = 1,15-1,3$); III – связно-разрушенные породы (уступы имеют крутой откос, $K_p = 1,03-1,05$, реже 1,05-1,1). Наиболее очевидные механизмы образования сыпучих разрушенных пород, близких по значениям K_p к полностью разрыхленной массе, заключаются в осыпании, разлете, а также растяжении при соударениях слоев или формировании купола (рис.4).

Породы II и III категорий, находящиеся в глубине разvala и составляющие при обычных параметрах взрывных работ большую его часть, не подвергаются осыпанию, разлету или растяжению. Проведенные расчеты показывают, что механизмом разуплотнения глубинных слоев может быть дилатансия (большие деформации сдвига связаны с резким убыванием смещения по мере удаления от свободной поверхности). Это предположение подтверждается сравнением расчетных кривых с данными работы [1], полученными при одновременных измерениях ε и смещений при взрывных работах на карьерах. Данные [1] дают основания полагать, что на практике реализуются оба типа дилатансионных кривых.

Второй пример использования предлагаемой методики относится к деформациям сыпучей среды. В рамках развивающегося подхода процессы уплотнения сыпучей массы подразделяются на четыре типа: перемещение кусков на «хорошие» места (увеличение p), «улучшение» положений кусков (уменьшение K_p^0), сжатие самих кусков (уменьшение I), дробление кусков (которое ведет к уменьшению n). Влияние каждого из этих процессов определяется общей зависимостью $K_p(K_p^0, p, n)$, пример такой зависимости показан на рис.5, а.

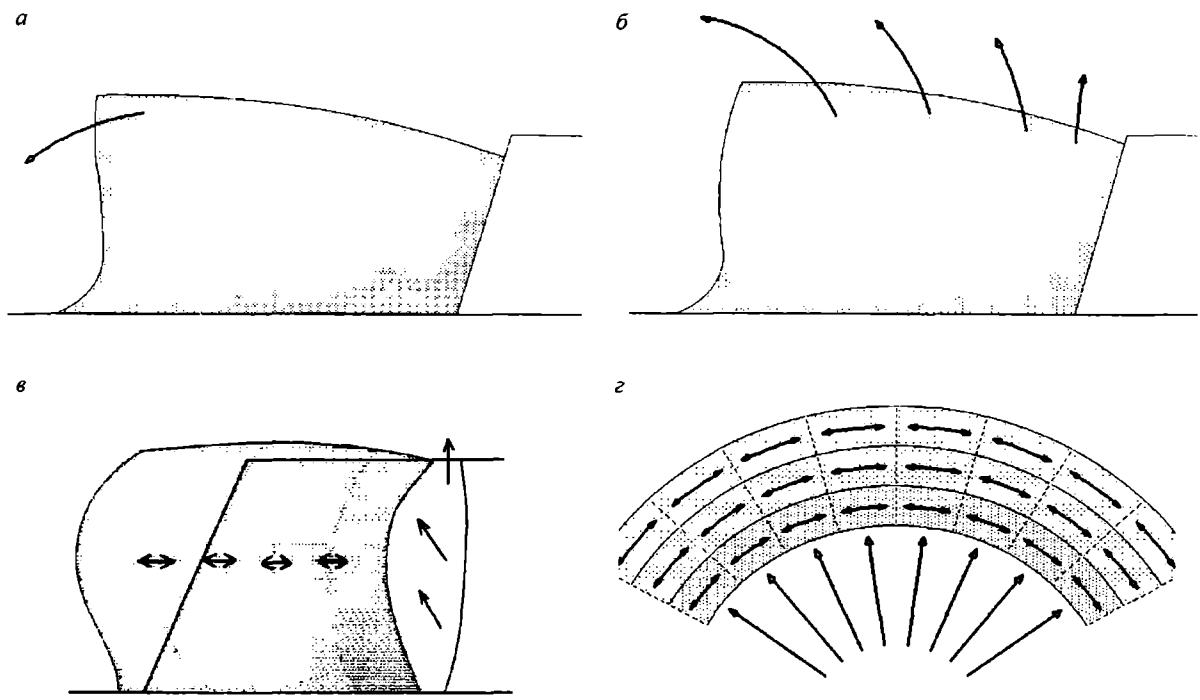


Рис.4. Основные механизмы разуплотнения близких к поверхности слоев породы при взрывном разрушении:
а – осыпание; б – разлет, в, г – растяжение

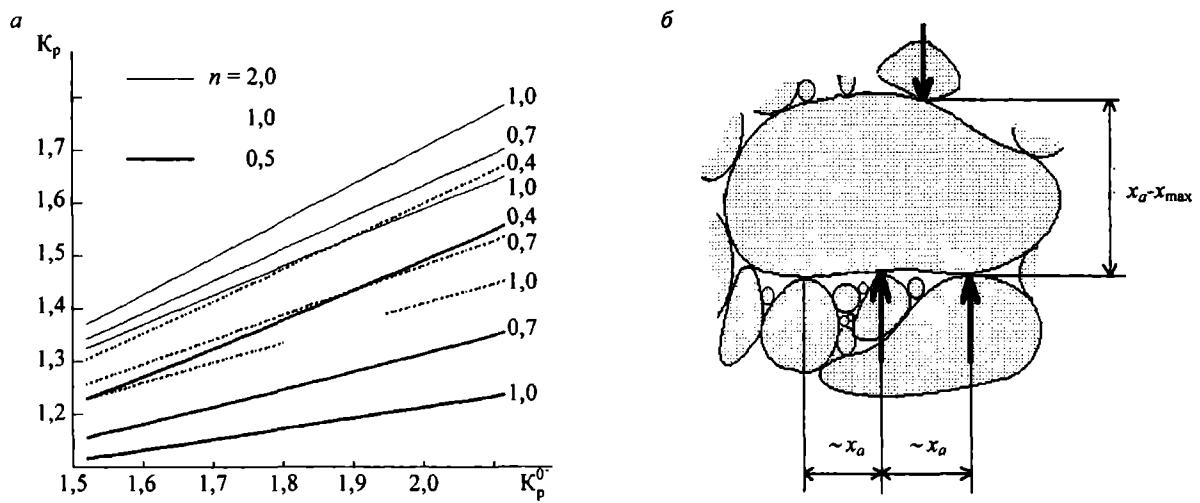


Рис.5. Влияние различных факторов на объем разрушенной породы:
а – пример зависимости $K_p(K, p, n)$, около кривых указаны значения p ; б – влияние x_a на механизм сжатия
раздробленной породы

При встряхивании или на ранних стадиях виброуплотнения (до тех пор, пока выбросепарация не играет существенной роли) изменение плотности прежде всего определяется значениями K_p^0 и p . Если куски имеют примерно одинаковые размеры (n ве-

лико), то качество смешения мало влияет на плотность, а K_p^0 методом проб и ошибок приближается к своему устойчивому значению \bar{K}_p^0 . Эффект уплотнения (разуплотнения) определяется разностью K_p^0 и \bar{K}_p^0 ; дос-

тигнутое при этом значение K_p не является устойчивым, при больших вибрациях разрыхление может снова измениться в большую (меньшую) сторону. При вибрации, осуществляющей одновременно со сжатием, в однородном по размерам частиц материале выход кусков из зацепления происходит в узком временном интервале (быстрые «пропадки»); если же в среде присутствует широкий набор размеров кусков (n мало), то пропадки имеют более плавный характер. В отсутствии сжатия в среде с малым значением n , основное значение приобретает качество смещения. Такие материалы требуют больших амплитуд смещения, в то же время достигнутое уплотнение более устойчиво к новым вибрациям, чем у материалов с однородным гранулометрическим составом.

При неравномерном сжатии основную роль в уплотнении играют дилатансия, приводящая к изменениям K_p^0 , и дробление. Вклады дилатансии и дробления в уплотнение прежде всего зависят от отношения σ_2 / σ_1 , трения на поверхностях кусков и их прочности. Так как крупные куски отличаются большей шероховатостью и меньшей прочностью, то с уменьшением размеров кусков уменьшается вклад дробления и растет вклад дилатансии.

Для сыпучих сред со сложным гранулометрическим составом роль среднего размера частиц играет эффективный размер жесткого скелета x_a . При низком качестве смещения x_a представляет собой некоторый диапазон размеров. Для хорошо перемешанной совокупности ($p \approx 1$) значение x_a примерно совпадает с минимальным размером частиц жесткого скелета и может быть приближенно вычислено по формуле

$$x_a = \frac{d_0(n+1)}{n(5n-1)^{1/(n-0,4)}}.$$

Грубая оценка с учетом масштабной зависимости прочности приводит к соотношению $\Delta d / d_0 \sim \sqrt{x_a}$, где $\Delta d = d_0 - d$ – изменение среднего размера кусков в результате дробления; влияние x_a на разрушение может пониматься как изменение пролета балки

(рис.5,б). Например, в опытах Г.И.Покровского и Н.П.Лушнова [4] при примерно равных усилиях сжатия кусков из прочного гранита ($[\sigma_{сж}] \sim 30$ МПа) в смеси с $n \approx 1,5$ средний размер кусков изменился в 1,44 раза, а в смеси с $n \approx 0,4$ – только в 1,067 раза; т.е. значения $\Delta d / d_0$ различались в 5 раз, а значения $\sqrt{x_a}$ примерно в 5,5 раз. Отметим, что получившиеся в результате дробления новые куски заметно повышают значения p и снижают значения n , что приводит к увеличению эффективной прочности и постепенному прекращению разрушения, поэтому уцелевшие в начале процесса крупные куски могут «дожить» до очень высоких давлений.

Проведенные исследования позволяют сделать некоторые качественные выводы относительно поведения пород в зонах разрушения при неравномерных нагрузках. Возникающие при неравномерном нагружении сдвиговые деформации могут приводить к смещениям блоков друг относительно друга и дилатационным изменениям объема, которые существенно влияют на напряженное состояние и вызывают динамические явления. Течение этих процессов существенно зависит от гранулометрического состава блоков. При больших величинах средних размеров блоков x_{cp} и приблизительно однородном гранулометрическом составе ($n \rightarrow \infty$) выход блоков из зацепления и проскальзывания затруднен, поэтому блочная структура мало сказывается на течении процессов. Поведение блочных массивов с такими характеристиками гранулометрического состава мало отличается от поведения сплошной среды, дилатационное разуплотнение в первую очередь связано с возникновением и развитием микротрещин.

При небольших размерах блоков и малых значениях n сдвиговые нагрузки приводят к смещениям блоков, которые сопровождаются дилатационным увеличением объема. Так как при малых значениях n величина x_a много меньше, чем x_{cp} , то образование крупных трещин в блоках маловероятно. Кроме того, проскальзывание блоков ведет к поверхностным разрушениям (отделению малых фрагментов на их поверхностях [13]), которые вызывают дополнитель-

ное уменьшение значения n . Этот процесс повышает плотность упаковки (за счет перехода с одной дилатансионной кривой на другую) и в значительной мере сдерживает увеличение объема. В дальнейшем сдвижение в основном сосредотачивается в узких областях скольжения с минимальными значениями n , а в остальных частях зоны разрушения создаются благоприятные условия для «залечивания» трещин.

Наиболее сложная ситуация возникает при относительно больших значениях среднего размера блоков и показателя однородности дробления ($n > 1 - 1,5$). В разрушенных породах такого типа возможны смещения блоков и проскальзывания, однако они сопровождаются существенным увеличением удельного объема среды и ростом напряжений, препятствующих сдвижению. В результате имеют место дробление блоков в зоне разрушения, причем не только поверхностное, но и объемное (деление на сравнимые по величине части [13]), так как значения x_a и x_{cp} близки по порядку величин, а также образование крупных трещин в областях, окружающих зону разрушения. Формирование крупных трещин сопровождается сбросом напряжений и сейсмическими явлениями. Знакопеременные нагрузки могут привести к уплотнению разрушенной породы за счет уменьшения K_p^0 , достигаемого методом проб и ошибок. Однако такое уплотнение не является устойчивым, и при следующих подвижках более или менее постоянного направления процессы дилатационного разуплотнения и дробления возобновятся.

Дальнейшее развитие процесса зависит от соотношения интенсивности разрушений в самой зоне и окружающей ее области. При преобладании разрушений, в первую очередь поверхностных, в самой зоне постепенно снижаются значения x_{cp} и n , что в конечном счете приводит к уплотнению породы и прекращению объемных разрушений. В противном случае разрывы и динамические явления продолжаются, причем центры наиболее интенсивного течения процессов смещаются в соседние области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Е.Г. Некоторые параметры физического состояния взорванного массива и их связь с коэффициентом разрыхления / Е.Г.Баранов, И.А.Тангаев, Я.М.Додис // ФТПРПИ. 1972. № 2.
2. Бобряков А.П. Влияние слабых сотрясений на статически напряженный массив сыпучей среды // ФТПРПИ. 2008. № 2.
3. Введение в механику скальных пород / Под ред. Х.Бока. М.: Мир, 1983.
4. Дробление скальных массивов взрывом в практике гидротехнического строительства / А.Е.Азаркович, М.И.Шуйфер, Г.И.Покровский, Н.П.Лушнов. М.: Энергоатомиздат. 1993.
5. Михалюк А.В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. Киев: Наукова думка, 1980.
6. Мелкозернистый бетон на основе модифицированной высококонцентрированной вяжущей суспензии кварцевого песка / Е.А.Дороганов, В.С.Лесовик, Н.Г.Передерев, Н.И.Алфимова // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 7.
7. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996.
8. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984.
9. Пивинский Ю.Е. Реология в технологии керамики и огнеупоров. Полидисперсность и дилатансия вквс смешанного состава / Ю.Е.Пивинский, Е.А.Дороганов // Огнеупоры и техническая керамика. 1998. № 11-12.
10. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть 1. М.: Недра, 1985.
11. Ставрогин А.Н. Механика деформирования и разрушения горных пород / А.Н.Ставрогин, А.Г.Протосеня. М.: Недра, 1992.
12. Тузовский М.А. Математическое моделирование дилатирующей среды // Тез. докл. IV Всерос. конф. молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Красноярск, 2003.
13. Цирель С.В. К вопросу о дроблении горных пород взрывом: Разрушение взрывом и необратимые деформации горных пород / ИГД. М., 1997.
14. Цирель С.В. Методы расчета объемной плотности горной массы // ФТПРПИ. 1994. № 1.
15. Nedderman R.M. Statics and Kinematics of Granular Materials / Cambridge University Press. 1992.
16. Reynolds O. On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact, with experimental illustrations // Phil. Mag., Series. 1885. V.20. N 5.
17. Cundall P.A., Voegele M., Faihurs C. Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data. 16th Sympos // Rock Mech Univ. of Minnesota, 1970.
18. Tsirel S.V. Methods of granular and fragmented material packing density calculation // Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. 1997. V.34. N 2.
19. Zhao J. Joint surface matching and shear strength // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1997. V.34. N 2.

REFERENCES

1. Baranov E.G., Tangaev E.A., Dodis Ja.M. On some parameters of the blasted massif physical state and their relation to the coefficient of loosening // FTPRPI. 1972. N 2.

2. Bobrjakov A.P. Agency of weak shaking on statically in tense file of loose medium // FTPRPI. 2008. N 2.
3. An introduction to rock mechanics / Edited by H.Bock. Moscow: Mir, 1983.
4. Azarkovich A.E., Shuifer M.I., Pokrovski G.I., Lushnov N.P. Rock massif fragmentation by blasting applied to dam building. Moscow: Energoatomizdat, 1993.
5. Mikhaliuk A.V. Rocks under nonuniform dynamic load. Kiev: Naukova Dumka, 1980.
6. Doroganov E.A., Lesovik V.S., Perekereev N.G., Alsimova N.I. Fine concrete on the basis of inoculated high-concentration knitting suspension of arenaceous quartz // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2007. N 7.
7. Nikolaevskij V.N. Rock mechanics and fluid dynamics. Moscow: Nedra, 1996.
8. Nikolaevskij V.N. Mechanics of porous and jointed media. Moscow: Nedra, 1984.
9. Pivinskij Ju. E., Doroganov E. Reology in technology of ceramics and refractory materials. 7. Polydispersity and dilatancy of mixed VKVS-materials // Ogneupory i tehnicheskaja keramika. 1998. N 11-12.
10. Rzhevski V.V. Open-cast mining. Part 1. Moscow: Nedra, 1985.
11. Stavrogin A.N., Protosenia A.G. Mechanics of rock deformation and fracture. Moscow: Nedra, 1992.
12. Tuzovskij M.A. Mathematical modelling dilatancy medium // Thes. of reports IV Russian. Conferences young scientists on mathematical modelling and the informational production engineering. Krasnojarsk, 2003.
13. Tsirel S.V. Studies in the rock blasting: Rock blasting and irreversible rock deformation / Skochensky Mining Institute. Moscow, 1997.
14. Tsirel S.V. Methods of calculation of bulk density of mining materials // FTPRPI. 1994. N 1.
15. Nedderman R.M. Statics and Kinematics of Granular Materials / Cambridge University Press. 1992.
16. Reynolds O. On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact, with experimental illustrations // Phil. Mag., Series. 1885. V.20. N 5.
17. Cundall P.A., Voegele M., Faihurs C. Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data. 16th Sympos // Rock Mech Univ. of Minnesota. 1970.
18. Tsirel S.V. Methods of granular and fragmented material packing density calculation // Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. 1997. V.34. N 2.
19. Zhao J. Joint surface matching and shear strength // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1997. V.34. N 2.