

Академик НАН Украины А.Ф. Булат,
кандидаты техн. наук С.Ю. Макеев,
С.Ю. Андреев,
мл. научн. сотр. Г.А. Рыжов
(ИГТМ НАН Украины)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВОГО И РОТАЦИОННОГО ПОДХОДОВ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ШАХТАХ

У роботі зроблена спроба перенести і розширити відомі погляди про хвилеві процеси в земній корі на механізм виникнення викидів у вуглепородному масиві. Для опису розповсюдження хвиль в нелінійному середовищі використано відоме рівняння синус-Гордона, властивістю якого є існування солітонних рішень за певних граничних умов. Внаслідок багатократного перевідбивання коливань в системі відбувається перерозподіл енергетичних ансамблів. У разі розсіяння енергії по масиву можна говорити про безпечну ситуацію, а у разі зосередження і накопичення її в декількох концентраторах напружень створюється передвипадонебезпечна ситуація, яка може бути спровокована навіть невеликою деформацією. Для запобігання динамічного явища пропонується зменшити градієнт деформацій до безпечної межі шляхом зміни блокової складової масиву, тобто придання йому більш однорідної структури.

WAVE AND ROTARY APPROACHES APPLIED FOR INTERPRETATION OF DYNAMIC PHENOMENA IN THE MINES

In the article, an attempt is undertaken to extend and apply knowledge of the wave processes occurred in the earth's crust to mechanism of the outburst occurrence in the coal-rock mass. To describe wave propagation in the nonlinear environment, the well-known sine-Gordon equation is used which is characterized by soliton solutions existing in certain boundary conditions. Due to the multiple wave reflections, energy ensembles are re-distributed in the system. When the energy is dissipated throughout the whole rock massif it is possible to say about safe situation, however, when the energy is concentrated and accumulated in several stress concentrators it should be understood that preconditions for outburst risk are created presenting danger even at small deformation. To prevent the dynamic phenomenon, it is proposed to decrease gradient of the deformations to the safe level by changing block structure of the rocks, i.e. to make the rock structure more homogeneous.

Несмотря на многолетние интенсивные исследования процесса возникновения внезапных выбросов угля, породы и газа, механизм этого явления до сих пор неясен. Как правило, большинство выбросов, произошедших в угольных пластах, калийных солях, песчаниках и порфиридах приурочены к зонам геологических нарушений тектонического происхождения [1] и имеют общие внешние черты, что говорит об их единой природе. В данной статье предпринята попытка объяснения механизма данного явления с позиций волновых процессов происходящих в земной коре.

Последние достижения в области физики прочности говорят о существовании в деформируемом твердом теле механического самосогласованного поля, распространяющегося в виде волн смещений и поворотов [2], которые ассоциируются, в свою очередь, с маятниковыми и кручеными или же продольными, поперечными и ротационными волнами. Наличие такого спектра волн в деформируемом породном массиве говорит о достаточно непростой картине протека-

ния таких катастрофических явлений как землетрясения и внезапные выбросы угля, породы и газа в шахтах.

Само разделение нелинейных волн на вышеперечисленные виды выглядит достаточно условно [3]. Любые преобразования сплошной среды согласно теореме Коши-Гельмгольца можно представить в виде перемещения, поворота или деформации. Перемещение вызывает распространение в среде продольных волн сжатия-растяжения, поворот – ротационных или маятниковых волн, а деформация – поглощение волновой энергии.

Известно, что природа выбросов прямым образом связана со строением углепородного массива, который состоит из взаимосвязанных структурных отдельных частей. Это просматривается на разных масштабных уровнях, начиная с размеров кристаллических зерен до блочных элементов, образованных крупными разрывами [4]. Блоки некоторых уровней, как правило, отделяются друг от друга прослойками породы с ослабленными механическими свойствами, что сказывается на процессе распространения волн в такой среде. Существование неустойчивости в процессе передачи (перераспределении) поворотной деформации в системе взаимодействующих блоков заложено в самой природе сеймотектонического процесса [5], характер которого очень близок к особенностям возникновения газодинамических явлений в шахтах.

Крайне медленные ротационные волны вполне могут объясняться механизмом перераспределений тектонических напряжений. Так, волна, адекватная тектоническим напряжениям, должна быть инерционной и несравнимо медленнее сейсмических волн [6]. Это связано с тем, что наряду с обычными, в массиве обязательно существуют и напряжения, имеющие более масштабный характер [7].

В течение первой стадии протекания землетрясений или выбросов тектоническая волна является уединенным солитоном кручения, по величине отклика соответствующим силе проявления очага динамического процесса [8].

Со временем, после многократного переотражения за фронтом головной волны в структурно-неоднородной среде возникает стационарная картина – маятниковая волна в виде низкочастотных осцилляций вращательного движения частиц [9].

Вышесказанное позволяет вносить на различных масштабных уровнях уточнения к предложенной ранее феноменологической модели выброса [10], характеризующейся присутствием нелинейных плазменных эффектов, когда при определенном соотношении температурных и силовых нагрузок изменяется структура, минеральный состав, а также увеличивается система трещин угля и пород, вследствие чего возникают ионно-звуковые солитоновые волны, в свою очередь приводящие к внезапным выбросам и горным ударам.

На макроуровне продолжительность указанного процесса, по нашему мнению, зависит от величины действующих в массиве упругих волн кручения, физическая сущность которых может быть выражена в следующем виде [11]:

$$\sigma_x(t) = \Sigma \varepsilon_i(t) = \Sigma \lambda \cdot E \cdot K_{np} \int_{-\tau_n/2}^{+\tau_n/2} H(t) \cdot \exp\left(-\frac{\tau_n}{2} \cdot \frac{x}{v_g}\right) dt \quad (1)$$

где $\varepsilon_i(t)$ – элементарные механические деформации в виде чередующихся областей сжатия – σ_i и растяжения + σ_i , которые в совокупности формируют упругую волну кручения; λ – длина волны; E – модуль упругости; K_{np} – коэффициент проницаемости массива; $H(t)$ – наведенное гравитационное поле; τ_n – время преобразования упругой волны; x – пространственная координата; v_g – скорость распространения волны.

Крученые волны согласно [12] возникают преимущественно в неупругой неоднородной среде. Увеличение однородности среды и ее протяженности в пространстве приводят к приостановке распространения крученых поверхностных волн [13].

Следовательно, ротационный механизм динамического явления может оказаться более реальным по сравнению с общепринятой в настоящее время классической деформационной (сдвиговой) моделью. Он обуславливает накопление напряжений, в основе которого заложены процессы, приводящие к появлению внутри очага так называемого магистрального разрыва [14, 15]. Очевидно, что критические напряжения, необходимые для образования разрыва на поверхности блока, слабо сцепленного с окружающей средой, существенно меньше, чем критические напряжения, необходимые для его образования в цельных горных породах.

Авторами [16] указывается, что для возникновения газодинамического явления необходимо, чтобы частота ω колебательного процесса при лавинообразном дефектообразовании, приводящем к созданию магистральной трещины, была меньше частоты колебаний плазменного процесса. При этом, распространение волн в плазме определяется её диэлектрическими свойствами, описываемыми с помощью тензора диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} + \frac{4\pi i}{\omega} \sigma_{\alpha\beta}(k, \omega), \quad (2)$$

где $\delta_{\alpha\beta}$ – символ Кронекера; $\sigma_{\alpha\beta}(k, \omega)$ – тензор проводимости; k и ω – соответственно, волновой вектор и частота волн в плазме; $\alpha, \beta = 1, 2, 3$.

На микроуровне в рассматриваемой феноменологической модели [10] следует учитывать существование в элементах напряженной угольно-породной среды блуждающих стохастических электрических полей, порожденных деформациями: в породе – кварца, а в угле – кристаллоподобных образований, возникших при изменениях его структуры и минерального состава под действием термодинамических нагрузок [17, 18]. При этом, может происходить с одной стороны – пробой углеводородного газа (метана), а с другой – возникновение сдвига и кручения кристаллов друг относительно друга, что способствует

появлению дополнительного потока тепла в результате трения между кристаллами, провоцирующего упомянутые выше микроплазменные эффекты.

В укрупненном масштабе величина энергии и момент силы упругого поля для достаточно крупных размеров структурных отдельностей массива способны достигать больших значений [14]. Это происходит при наличии определенного количества поворачивающихся (взаимодействующих) блоков, составляющих горный массив и вращающихся с определенной угловой скоростью. Уравнение их движения с учетом момента силы поля упругих напряжений, появляющегося вокруг блока в результате его поворота, и момента силы, отвечающего за взаимодействие блоков, можно записать в виде известного уравнения синус-Гордона для некоторой функции $f(x, t)$, зависящей от координаты и времени:

$$\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial t^2} = \sin f(x, t) \quad (3)$$

Решением этого уравнения являются устойчивые локализованные волны – солитоны [19, 20]:

$$\varphi(x, t) = 4 \cdot \operatorname{arctg} e^{\gamma(x - x_0 - t \cdot v)} \quad (4)$$

где x_0 – центр солитона; v – его скорость; $\gamma^2 = \frac{1}{1 - v^2}$.

В выражении (4) приведено односолитонное решение, для которого выбран положительный корень для γ , представляющее виток по переменной φ , который переводит одно решение при $\varphi = 0$ в смежное при $\varphi = 2\pi$.

Двухсолитонные решения уравнения синус-Гордона также проявляют характерные свойства солитонов. Волны проходят сквозь друг друга как полностью проницаемые, и единственный наблюдаемый эффект – фазовый сдвиг. Так как сталкивающиеся солитоны сохраняют свою скорость и форму, такой вид взаимодействия называют упругим столкновением.

Очаг происходящего газодинамического явления и окружающая его среда могут находиться на двух энергетических уровнях, каждый из которых соответствует квазиравновесному состоянию. Поэтому переход блока из одного состояния в другое возможен с выделением или поглощением упругой энергии. Последнее определяется скоростью поворотной деформации, и учитывается дополнением в правую часть уравнения (3) двух слагаемых, которые связаны с неоднородностью вращения блоков и приводят к неустойчивости решения [14, 21]:

$$\frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 f(x, t)}{\partial t^2} = \sin f(x, t) + \alpha \cdot \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} + \mu \cdot \delta(x) \cdot \sin f(x, t), \quad (5)$$

где α – коэффициент трения, μ – параметр, характеризующий вынуждающую силу, вызывающую неоднородное вращение блока, $\delta(x)$ – дельта функция.

В отличие от уравнения (3), последнее уравнение не имеет аналитического решения. Его численное решение основано на использовании методов Маклафлина-Скотта и Рунге-Кутта [22]. При этом скорость распространения локализованной волны уже не является величиной постоянной и кроме угловой скорости вращения тела зависит также и от параметров α и μ [14].

Проведенный анализ возможностей сосуществования различного рода волновых процессов, возмущающих угольно-породную среду, позволяет уточнить вышеупомянутую феноменологическую модель [10] с позиции условий и особенностей формирования солитонов. Солитоны – структурно устойчивые одиночные волны, распространяющиеся в нелинейной среде и особенно опасны в пределах блочной структуры, так как в свою очередь, являются источником зарождения маятниковых волн кручения вследствие многократного отражения головного фронта возмущения от границ блоков. А если учесть, что блочная составляющая является неотъемлемой частью углепородного массива, то наличие таких волн является достаточным условием для возникновения таких газодинамических явлений как внезапные выбросы угля, породы и газа. Отсюда можно сделать вполне определенный вывод о том, что предотвратить образование этих волн и уменьшить их негативное влияние на массив возможно путем управляющего воздействия для придания его блочной составляющей однородной структуры (сглаживание границ между блоками). Одним из возможных способов такого воздействия на углепородный массив является нагнетание в горные породы твердеющих составов, которые, растекаясь под большим давлением по трещинам, восстанавливают объемное напряженное состояние породного массива.

В основе предлагаемого способа лежат свойства жидкостей принимать форму того объема, в который они помещены, то есть повторять формы контуров поверхностей трещин, практически не сжиматься, передавать давление во все стороны одинаково, следовательно, действовать по всей поверхности трещин. В дальнейшем упрочняющие составы затвердевают в трещинах горных пород с высокой собственной прочностью и адгезией к ним. Нагнетаемый состав, заполняя трещины между блоками-отдельностями массива, при больших давлениях действует на эти блоки в направлении их сжатия с одной или нескольких сторон, в зависимости от числа систем трещин. После затвердевания состава состояние объемного сжатия отдельностей массива сохраняется: он превращается в монолитное образование с близкими по величине внутренними напряжениями. При ликвидации градиента плотности на границах блоков и придании большей упругости пространству волны кручения не формируются, энергия не накапливается и, в конечном итоге, происходит затухание разрушительного процесса. Вышесказанное подтверждается исследованиями ряда авторов [23-25], выполнивших теоретическое и экспериментальное обоснование особенностей распространения волн маятникового типа по двухмерной регулярной блочной системе при действии локального импульса.

Профилактическое выравнивающее воздействие на горный массив происходит согласно рассматриваемой модели как на макроуровне (препятствие возникновению смещений и поворотов блоков в массиве под влиянием напряжений

дальнодействующего характера), так и на микроуровне (препятствие сдвигу и кручению структурных породных кристаллов друг относительно друга).

По нашему мнению, в качестве такого воздействия, для зон со скачкообразным характером изменения напряжений и аномально меняющейся однородностью и проницаемостью угля и горных пород рекомендуется использовать физико-химическую обработку (ФХО) массива. Рабочей жидкостью могут служить полимерные композиции, способные первоначально произвести межструктурную пластификацию углепородной среды с последующим, что особенно важно, общим упрочнением на макроуровне. Это позволяет изменить до безопасного предела относительные деформации в выбросоопасном пласте, а также за счет упрочняющего действия раствора повысить однородность структуры массива. Инъектирование в него химических растворов в течение определенного промежутка времени необходимо для полной и равномерной пропитки, при которой одновременно с изменением неупругих свойств происходит изменение упругих характеристик массива, обработанного полимерными композициями. Двойственность указанного воздействия заключается, с одной стороны, в упорядочении действующих сил давления, приводящего к их более равномерному распределению, а, с другой – в более активном вовлечении в противодействие участков с преобладанием пластичных свойств. Это препятствует ветвлению трещин, переводит затраты подводимой энергии с процесса хрупкого разрушения на процесс пластического деформирования, повышает прочность при ударной нагрузке [26], а значит и способствует приостановке процесса зарождения и развития газодинамического явления.

Регулируя концентрацию химических компонентов в нагнетаемом составе можно тем самым, управлять временем затвердевания раствора и величиной развивающихся в массиве упругих и неупругих характеристик. В дальнейшем представляет интерес рассмотрение предельных значений релаксирующих напряжений при ФХО. Следует стремиться к тому, чтобы они не превышали напряжений в необработанном пласте. ФХО на основе нагнетания полимерных композиций в свете снижения опасности динамических явлений незаменима вследствие ее специфической особенности одновременно оказывать пластифицирующее и упрочняющее действие. Упрочнение дополнительно увеличивает однородность структуры угля и вмещающих пород, окончательно устраняя градиент физико-механических характеристик массива, но величина предельных напряжений остается неизменной или уменьшается.

Таким образом, для увеличения однородности трещиновато-блочной структуры выбросоопасного горного массива и предотвращения в нем смещающих и поворотных деформаций требуется заблаговременное воздействие, гасящее волновой процесс. Таковым может служить ФХО пласта, позволяющая смягчить на микроуровне склонность среды к газодинамическим явлениям за счет вовлечения пластифицированных участков в процесс изоляции хрупкого разрушения, а на макроуровне – вследствие заполнения межблочного пространства упрочняющим химическим составом, приводящим к повышению однородности породного массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большинский М.И. Газодинамические явления в шахтах / М.И. Большинский, Б.А. Лысиков, А.А. Каплюхин. – Севастополь: Вебер, 2003. – 284 с.
2. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации / В.А. Лихачев, В.Е. Панин, Е.Э. Засимчук [и др.] – Киев: Наукова думка, 1989. – 320 с.
3. Гарагаш И.А. Механика Коссера для наук о Земле / И.А. Гарагаш, В.Н. Николаевский // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2, № 4. – С. 44-66
4. Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород / М.А. Садовский // ДАН СССР. – 1979. – Т. 247, № 4. – С. 829-832.
5. Викулин А.В. Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса / А.В. Викулин, В.Г. Быков, М.Н. Лунева // Вычислительные технологии. – 2000. – Т.5, № 1. – С.31-39.
6. Михайлов Д.Н. Тектонические волны ротационного типа с излучением сейсмического сигнала / Д.Н. Михайлов, В.Н. Николаевский // Физика Земли. – 2000. – № 11. – С. 3-10.
7. Лихачев В.А. Континуальная теория дефектов / В.А. Лихачев, А.Е. Волков, В.Е. Шудегов. – Л.: Из-во Ленингр. ун-та, 1986. – 232 с.
8. Курленя М.В. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч.II / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // ФТПРПИ. – 2000. – № 4. – С.3-26.
9. Садовский В.М. Математическое моделирование волн маятникового типа с применением высокопроизводительных вычислений / В.М. Садовский, О.В. Садовская, М.П. Варыгина // Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: 2-ая Российско-Китайская научная конференция, 2-5 июля 2012 г. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. – С. 138-144.
10. Феноменологическая модель генезиса динамических явлений в шахтах / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, С.Ю. Андреев, Г.А. Рыжов // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: Матеріали II міжнародної конференції, 18 травня 2011 р. – Дніпропетровськ: НГУ, 2011. – С. 11-16.
11. Пчелинцева О.Н. Математическое моделирование факторов влияния магнитоэлектрических преобразователей механических величин / О.Н. Пчелинцева, Е.С. Демин, С.Б. Демин // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 1 (21). – Ч. 2. – С. 99-104.
12. Short communications. Propagation of torsional surface waves in viscoelastic medium / Gupta S. [et al.] // Int. J. Numer. and Anal. Meth. Geomech. – 1996. – 20, № 3. – С. 209-213.
13. Propagation of torsional surface waves in a homogeneous substratum over a heterogeneous half-space / Dey J. [et al.] // Int. J. Numer. and Anal. Meth. Geomech. – 1996. – 20, № 4. – С. 287-294.
14. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса / А.В. Викулин. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2003. – 151 с.
15. Симоненко С.В. Статистическая термогидродинамика необратимых сдвигово-вращательных процессов / С.В. Симоненко // Ротационные процессы в геологии и физике. – М.: КомКнига, 2007. – С. 225-251.
16. Особенности процесса трещинообразования в массиве при управлении его газодинамикой / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, С.Ю. Андреев [и др.] // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепрпетровск, 2011. – Вып. 94. – С. 24-30.
17. Развитие гипотезы возникновения газодинамических явлений в результате формирования микроплазменных разрядов в подземных условиях / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, В.Я. Осенний, С.Ю. Андреев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепрпетровск, 2012. – Вып. 104. – С. 3-9.
18. Влияние различного рода воздействий на свойства и состояние газонасыщенного угленосного массива / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, В.Я. Осенний [и др.] // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XVII Межд. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2007. – С. 52-56.
19. Скотт А. Солитон – новое понятие в прикладных науках / А. Скотт, Ф. Чжу, Д. Маклафлин // ТИИЭР. – 1973. – Т.61. – С.79-123
20. Филиппов А.Т. Многоликий солитон / А.Т. Филиппов. – М.: Наука, 1990. – 288 с.
21. Быков В.Г. Нелинейные волновые процессы в геологических средах / В.Г. Быков. – Владивосток: Даль-наука, 2000. – 190 с.
22. Perturbation theories for sine-Gordon solution dynamics / M. Salerno, M.P. Soerensen, O. Skovgaard, P.L. Christiansen // Wave Motion. – 1983. – № 5. – № 1. – P.49-58.
23. Александрова Н.И. О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород / Н.И. Александрова, А.Г. Черников, Е.Н. Шер // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2006. - №5. - С. 67-74.
24. Влияние иерархической структуры блочных горных пород на особенности распространения сейсмических волн / Е.Н. Шер, Н.И. Александрова, М.В. Айзенберг-Степаненко, А.Г. Черников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2007. - № 6. - С. 20-27.
25. Александрова Н.И. Моделирование распространения упругих волн в блочной среде при импульсном нагружении / Н.И. Александрова, М.В. Айзенберг-Степаненко, Е.Н. Шер // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2009. - № 5. - С. 21-32.
26. Забигаило В.Е. Физико-химические методы управления состоянием угольно-породного массива / В.Е. Забигаило, Ю.Ф. Васючков, В.В. Репка. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.

ОЦЕНКА ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ НОВОКОНСТАНТИНОВСКОГО УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Виконано оцінку показників фізико-механічних властивостей руд і вміщуючих порід, розташованих на глибинах до 300 м і більше. Запропоновано шкалу оцінки складності гірничо-геологічних умов розробки Новокостянтинівського родовища урану.

ASSESSMENT OF MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS OF NOVOKONSTANTINOVSK URANIUM DEPOSIT DEVELOPMENT

Physical and mechanical parameters of the ores and enclosing rocks bedded at the depth of 300 meters and deeper were estimated. A scale is proposed for assessing geological conditions of the Novokonstantinovsk uranium deposit development.

Среди новых, наиболее перспективных в Украине, следует отметить Новоконстантиновское урановое месторождение. Геологоразведочными изысканиями установлено, что оно относится к месторождениям урановой формации и залегает в карбонатно-натриевых метосамотитах (альбинитах). По характеру залежей и морфологическим особенностям, а также физико-механическим свойствам руд и пород месторождение, с известной степенью вероятности, можно считать аналогом месторождений, обрабатываемых Ингульской и Смолинской шахтами ВостГОКа. Учитывается, что Новоконстантиновское месторождение планируется к освоению и на данный период времени крайне слабо изучено в геомеханическом плане, правомерно, для первоначальной оценки его горно-геомеханических условий, использовать как немногочисленные данные о свойствах пород, полученные в лабораторных условиях, так и материалы по указанным шахтам.

Решение горнотехнических задач требует получения информации о ряде показателей свойств руд и пород, установленных прямыми методами измерений и косвенными, полученными методами вычисления. В частности, анализируя и обобщая данные о свойствах руд и пород шахт ВостГОКа, были вычислены коэффициенты, необходимые для расчетов параметров систем разработки и решения задач, связанных с поддержанием горных выработок [1].

Ключевая задача в определении параметров системы разработки рудных месторождений – оценка прочности массива скальных пород на базе лабораторных испытаний. При этом важным элементом является учет структурно-фазового состояния пород и масштабного эффекта прочности. Доказано, что прочность массива с увеличением учитываемого объема снижается асимптотически [2]. По разным источникам, в зависимости от коэффициента трещиноватости (количества трещин на метр или квадратный метр), прочность массива составляет 0,22-0,40 от прочности образцов. При коэффициенте линейной трещиноватости $K_m = 1,2-4,0$ коэффициент снижения прочности массива составляет от 0,7-0,8 до 0,3-0,5. По данным ИГД УрО РАН для больших обнажений устойчивых массивов эта величина составляет 0,4-0,5; для массивов средней ус-