

УДК 622.834:622.268

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТОК

Дрибан В. А.

(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

На основе анализа уравнений энергетического баланса системы "выработка – массив горных пород" получен критерий потери устойчивости вмещающего массива. Данный критерий впервые увязывает физико-механические характеристики горных пород, как в упругом, так и в пластическом состоянии. Полученные результаты дают возможность целенаправленно разрабатывать конструктивно-технологические мероприятия, обеспечивающие охрану и поддержание горных выработок, находящихся в сложных горно-геологических условиях.

Based on the analysis of energy balance equations of the system mine working – rock mass criterion of enclosing rock mass stability loss is obtained. This criterion for the first time shows physical-mechanical characteristics of rock mass both in elastic and in plastic state. The obtained results give the possibility to develop steadfastly structural-technological measures that provide protection and maintenance of mine workings in complicated mining-geological conditions.

Одна из основных проблем при построении аналитических решений по определению устойчивости и деформированию контура выработок заключается в поиске метода прогнозирования, учитывающего наиболее характерные процессы разрушения горных пород вокруг выработки. Всеми исследователями постоянно подчеркивается структурная неоднородность массива, вмещающего горные выработки. В тоже время, постоянно говоря о неод-

нородности массива, практически все аналитические модели сводятся к сугубо однородному случаю. А именно, решается задача о распределении НДС вокруг выработки кругового сечения с равномерным отпором крепи. Такое положение вещей обусловлено, в первую очередь, трудностями математического характера, поскольку в этом случае нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее поведение пластической среды (Кулона-Мора, Треска и др.), сводится к простому одномерному уравнению 2-го порядка. Затем данное уравнение с "удовольствием" решается с различными, зачастую сложными, но, как правило, не имеющими отношения к реальности допущениями. Все это свидетельствует скорее об успехах вычислительных методов и процедур, нежели удовлетворяет потребностям практики. При этом оптимистично предполагается, что полученные поля напряжений с удовлетворительной точностью описывают реальную ситуацию.

Одновременно с этим попытки добиться сколько-нибудь приемлемых совпадений расчетных деформаций (смещений) приконтурного массива с фактически наблюдаемыми привело к введению многочисленных (и вообще говоря, неоправданных экспериментальным материалом) усложнений деформационной модели среды. Таких как снижение прочностных характеристик горных пород на 1-2 порядка по мере приближения к контуру выработки, увеличению коэффициентов дилатации и т.п., не связанных ни с историей нагружения, ни с уровнем возникающих напряжений по отношению к прочности вмещающего массива. Либо это связь весьма туманна и опосредована. Однако даже введение этих очень "сильных" допущений о поведении среды в предельном и запредельном состоянии "помогает объяснить" смещения контура выработки порядка 50-100 мм, что не соответствует наблюдаемым в реальных условиях 500 мм и более. Кроме того, введение коэффициентов ослабления в расчетные модели привносит большую неопределенность в конечный результат. Вследствие различных подходов к решению, полученные количественные значения существенно отличаются между собой, а также от фактически измеренных смещений. Более того, при построении деформационных моделей игнорируется тот факт, что искажения

контура выработок достигают десятков процентов и, соответственно, построение моделей в рамках теории "малых деформаций" становится, по всей видимости, не вполне корректным. Данное положение вещей также обусловлено трудностями математического характера. Дело в том, что учет этого факта приводит к необходимости решения уравнений с подвижными границами, что не только намного сложнее общего неоднородного случая, но и требует дополнительных нетривиальных соображений о физико-механических свойствах среды в целом и самих принципах оценки устойчивости упругопластических систем.

Отличие, которое наиболее сильно сказывается на расхождении результатов, связано с различными подходами к назначению остаточной прочности пород на контуре поперечного сечения выработки в зоне неупругих деформаций. Введение остаточной прочности связано с попыткой распространить условие прочности Кулона-Мора, выполняющееся при переходе горных пород в предельное состояние, на случай запредельных деформаций. Такой подход является приемлемым для описания качественной картины явления, однако известный произвол в назначении величины остаточной прочности (от нуля до прочности массива горных пород) не может привести к удовлетворительным результатам для всех условий. Многочисленные аппроксимации функций снижения прочностных характеристик различными аналитическими функциями не дают однозначных численных результатов, хотя одинаково удовлетворительно описывают данные экспериментов. Более сложные подходы к решению этой задачи, учитывающие зоны разрушения и трещиноватости вокруг выработки требуют в каждом конкретном случае большого объема испытаний образцов горных пород, что не только практически не реализуемо на стадии прогноза, но и ставит под сомнение получаемые результаты, поскольку последние существенно зависят от выбранных расчетных моделей.

В работах [1, 2, 3] на основе анализа экспериментальных данных и полученных новых решений о распределении полей напряжений и деформаций в горном массиве, вмещающем горные выработки, показано, что в процессе деформирования массив последовательно проходит дискретный ряд состояний, отвечающих

определенному соотношению физико-механических свойств массива и уровню горного давления. Уравнения напряжений в массиве, соответствующих различным стадиям деформирования, имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \sigma_r^{(n)} = C_1 r^{\alpha-2} (1 - \sin \rho \cos \varphi_n(\theta)) |\sin(0.5 \cdot \varphi_n(\theta))|^{\alpha-2} - K \operatorname{ctg} \rho \\ \sigma_\theta^{(n)} = C_1 r^{\alpha-2} (1 + \sin \rho \cos \varphi_n(\theta)) |\sin(0.5 \cdot \varphi_n(\theta))|^{\alpha-2} - K \operatorname{ctg} \rho \\ \tau_{r\theta}^{(n)} = C_1 r^{\alpha-2} \sin \rho \sin \varphi_n(\theta) |\sin(0.5 \cdot \varphi_n(\theta))|^{\alpha-2} \end{cases}, \quad (1)$$

где K – сцепление горных пород;

ρ – угол внутреннего трения;

$\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ – радиальные, тангенциальные и касательные напряжения соответственно;

$\varphi_n(\theta)$ – ряд гладких функций получаемый путем склейки значений функции $\varphi(\theta)$ на отрезках $\theta \in [\pi n; \pi + \pi n] \cup [-\pi - \pi n; -\pi n]$ для всех целых n от 0 до ∞ , определяемой следующим функциональным уравнением:

$$\varphi(\theta) + (1 + \sin \rho) \operatorname{ctg} \frac{\varphi(\theta)}{2} = 2\theta \quad (2)$$

Заметим, что функция $\varphi_\infty(\theta)$ генерирует тривиальное решение, получаемое в предположении симметричной картины распределения напряжений вокруг выработки, что соответствует состоянию неустойчивого равновесия. Далее, по мере развития деформационных процессов в зависимости от величины горного давления и физико-механических свойств вмещающих пород, массив вокруг выработки последовательно проходит дискретный полубесконечный ряд равновесных состояний, отвечающий гладким однозначным функциям $\varphi_n(\theta)$ при изменении n от ∞ до 1. И, наконец, при соответствующих геомеханических условиях, достигается напряженное состояние вмещающего массива, соответствующее функции $\varphi_0(\theta)$, которое принципиально отличается от предыдущих. Дело в том, что $\varphi_0(\theta)$ на интервале $[\min \varphi; \max \varphi]$ теряет свойство однозначности и, соответственно, можно выделить

такие значения деформирования контура выработки, которые отвечают неединственности решения системы уравнений пластичности. Иными словами, в этом случае достигается такое возмущение контура выработки, при котором при неизменных внешних параметрах нагружения становится возможным переход из сложившегося напряженного состояния массива в некоторое другое, то есть появляется точка бифуркации.

Проведенная серия расчетов для различных геомеханических условий показывает, что относительное возмущение контура выработки, при котором наступает потеря устойчивости, составляет 12 – 18 %. На рис. 1 представлена диаграмма последовательного пошагового деформирования контура выработки вплоть до потери устойчивости для различных углов внутреннего трения.

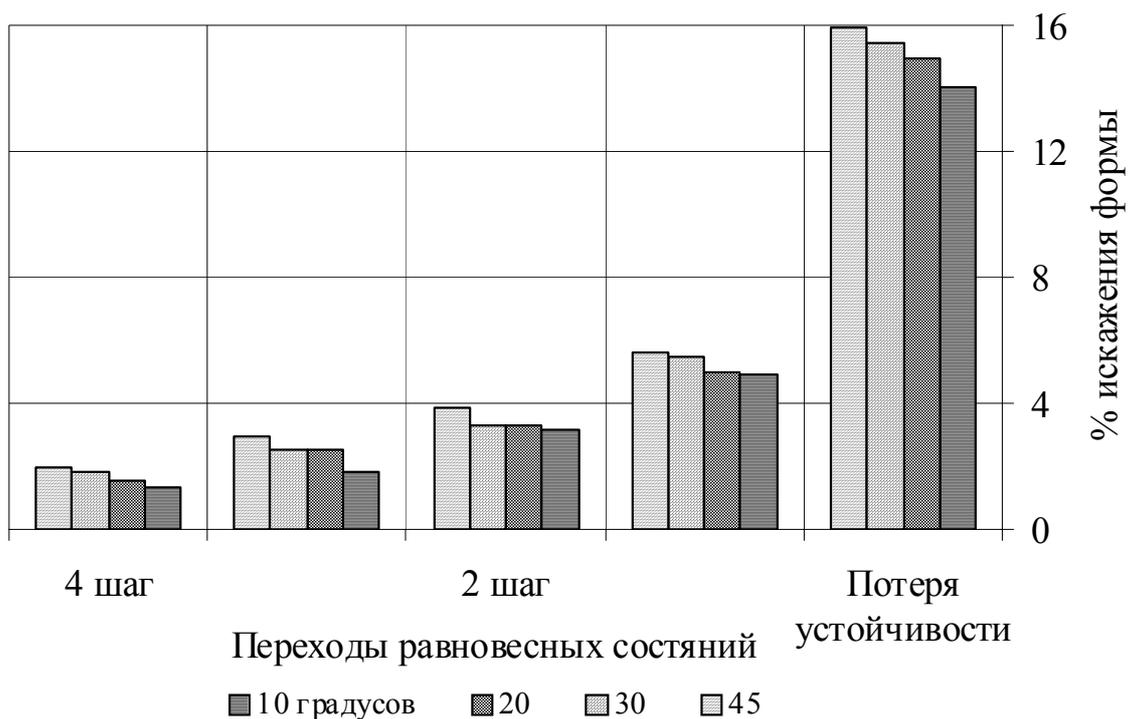


Рис 1. Относительное пошаговое смещение контура выработки

В тоже время, вопрос о геомеханических условиях, при которых появляется возможность указанного пути развития напря-

женно-деформированного состояния вмещающего массива и потери устойчивости системы "выработка – массив горных пород" остался открытым.

В настоящей работе предпринята попытка описать процесс развития зоны неупругих деформаций с точки зрения общезначимых положений.

Рассмотрим детально напряженно-деформированное состояние массива горных пород с расположенной в нем горной выработкой. При проведении горной выработки в массиве горных пород происходит перераспределение напряжений вблизи ее контура. Новое напряженное состояние определяется начальным напряженным состоянием массива, формой и расположением выработки, технологией ее проведения, физико-механическими свойствами пород и крепи, а также горно-геологическими и структурными особенностями залегания пород.

Анализ экспериментальных данных показывает, что породы вначале деформируются упруго, затем появляются неупругие деформации и возникает допредельное напряженное состояние, характеризующееся наличием упругих и пластических деформаций. При дальнейшем деформировании возникает предельное состояние, напряжения при котором удовлетворяют одному из уравнений пластичности.

В начальный период наибольшая концентрация напряжений имеет место на контуре выработки. Затем, в местах концентраций напряжений при превышении предела прочности, породы начинают пластически деформироваться или происходит их хрупкое разрушение и развивается зона неупругих деформаций от контура выработки вглубь массива. При этом, поскольку геоматериал (горные породы) "не выдерживают" возникающих напряжений, происходит диссипация энергии в системе "массив-выработка". Этот процесс идет до тех пор, пока энергия системы не достигнет своего минимума для данных геомеханических условий.

Таким образом, точка минимума энергии соответствует стабильному упругопластическому состоянию массива горных пород с выработкой и, соответственно, определяет размеры зоны неупругих деформаций. Следовательно, если мы научимся вычислять изменение энергии системы, то сумеем полностью опи-

сать процесс деформирования массива, как среды, обладающей способностью находиться в различных механических фазах – упругой и пластической.

Рассмотрим процесс деформирования зоны неупругих деформаций, которые образуются вокруг выработок. В процессе образования этой зоны горные породы разбиваются системой трещин на отдельные блоки (куски). При этом, несмотря на то, что зона вокруг выработки получает необратимые (неупругие) деформации, каждый из блоков подчиняется законам упругого деформирования. Это подтверждается хотя бы тем фактом, что образцы пород, извлеченные из зоны неупругих деформаций, при испытаниях ведут себя как упругое тело.

Механическое состояние горных пород в рамках механики деформируемого твердого тела решается как система уравнений механики плюс физическое уравнение, дающее связь между компонентами тензора деформации и напряжения. Простейший вид такой зависимости в упругой области дается законом Гука. В области пластических деформаций горных пород построение физического уравнения существенно усложняется, прежде всего, по причине ярко выраженной неоднородности их строения, наличия трещин и т.п.

При составлении континуальных уравнений для таких сред, обычно либо составляют уравнения для феноменологических средних параметров объема ΔV , либо формируют эти уравнения сначала в масштабе, который много меньше характерного масштаба микроструктуры, а затем усредняют их по объему.

В первом случае усреднение проводится в неявном виде, и возможные неточности устраняются специально подготовленными реологическими опытами для замыкания системы уравнений, так называемыми определяющими законами среды в целом. Во втором случае вид замыкающих связей, а иногда и конкретные значения реологических параметров, определяют теоретически.

В рамках сформулированных положений можно утверждать, что процесс формирования НДС вмещающего массива разбивается на два этапа. Вначале образуется зона пластических деформаций с распределением напряжений согласно классическим представлениям теории Кулона-Мора, затем начинает проявлять-

ся микроструктура каждого блока, которые в совокупности ведут себя как континуальная пластическая среда. Заметим, что крайними условиями на рассматриваемых блоках являются напряжения в пластической зоне.

Проиллюстрируем указанные соображения на классической простейшей модельной задаче. Итак, рассмотрим напряженно-деформированное состояние вокруг круглой горной выработки радиуса R_0 , расположенной на глубине H от поверхности. В качестве условия пластичности принимаем уравнение Кулона-Мора с прямолинейной огибающей. Тогда уравнение изменения энергии системы в полярной системе координат в соответствии с [1, 2, 3] описывается следующим образом:

$$\Delta W = \frac{1}{2E} \left(\int_0^{2\pi} \int_1^{\infty} f(\sigma_r^y, \sigma_\theta^y) r dr d\theta - \int_0^{2\pi} \int_1^R f(\sigma_r^{nl}, \sigma_\theta^{nl}) r dr d\theta - \int_0^{2\pi} \int_0^R f(\sigma_r^{y-nl}, \sigma_\theta^{y-nl}) r dr d\theta \right), \quad (3)$$

где $f(x, y) = x^2 + y^2 - 2\nu xy$;

R – текущий радиус;

Индексы y , nl и $y-nl$ относятся к распределению напряжений при начальном упругом состоянии массива, напряжениям в пластической зоне и напряжениям вне зоны неупругих деформаций соответственно.

На рис. 2, 3 приведены кривые изменения энергии системы "выработка-массив" при различных значениях давления и изменении текущего радиуса пластической зоны (в процессе формирования) для следующих условий: прочность пород 10 МПа, угол внутреннего трения 20° , коэффициент Пуассона 0,3.

Здесь необходимо сделать ряд замечаний. Как видно из приведенных графиков минимум энергии системы в точности соответствует размерам зоны неупругих деформаций, полученной аналитическим путем из совершенно иных, сугубо механических соображений и определяемой выражением:

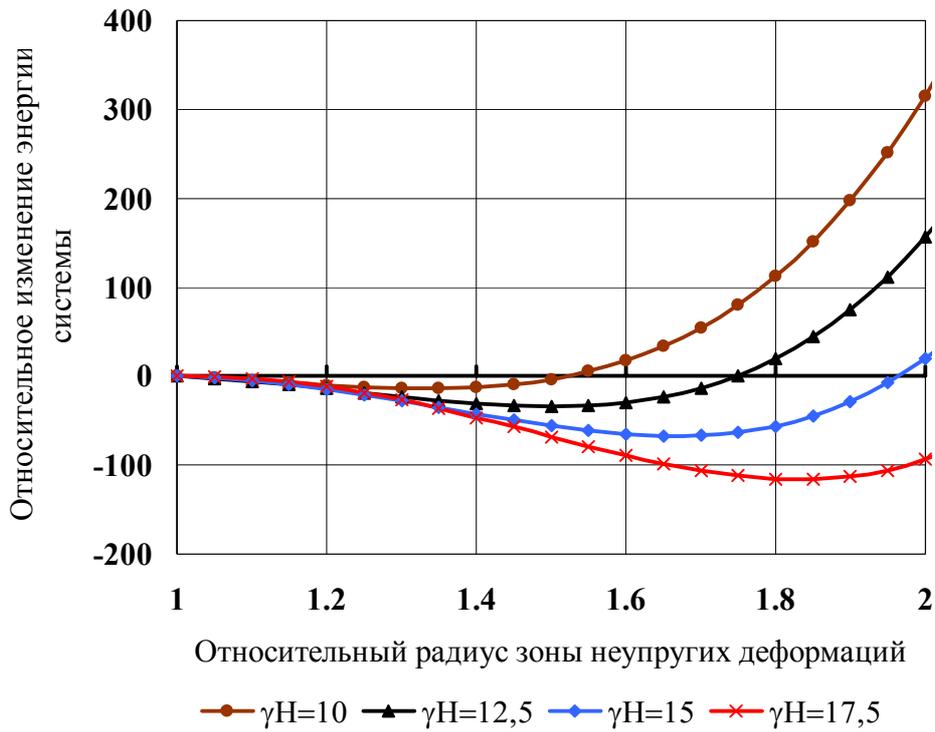


Рис. 2. Относительное изменение энергии системы "выработка- массив"

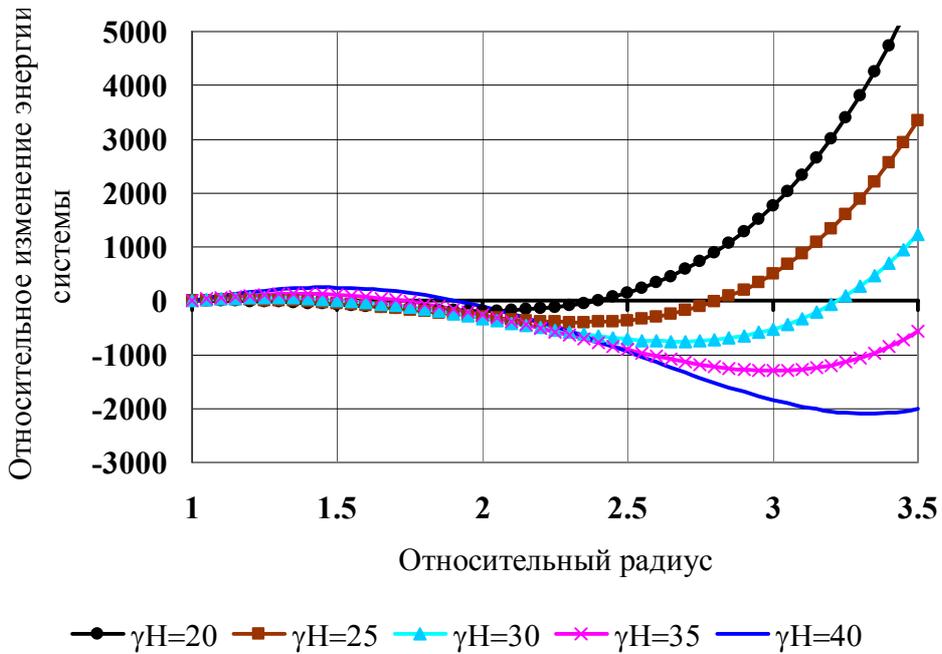


Рис. 3. Относительное изменение энергии системы "выработка- массив"

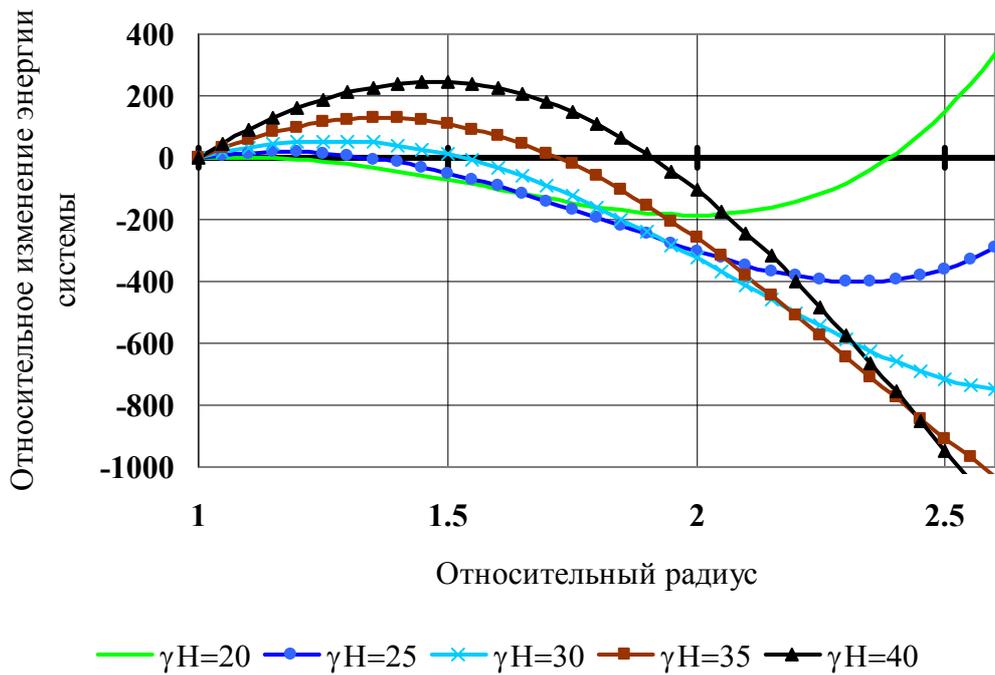


Рис. 4. Относительное изменение энергии системы "выработка- массив"

$$r = \left[\frac{\gamma H + Kc \operatorname{tg} \rho}{P + Kc \operatorname{tg} \rho} (1 - \sin \rho) \right]^{\frac{1 - \sin \rho}{2 \sin \rho}} \quad (4)$$

Это соответствие подтверждает корректность построенной модели. Но наиболее интересный момент заключается в том, что по мере роста зоны неупругих деформаций в процессе перехода в точку абсолютного минимума в ряде условий (см. рис. 3) оказывается, необходимо пройти через точку абсолютного максимума, где система повышает свою энергию. Для наглядности на рис. 4 показан фрагмент графиков рис. 3.

Отметим, что с физической точки зрения это абсолютно невозможно, поскольку тогда система "массив–выработка" должна повышать свою энергию в процессе разрушения горных пород. Таким образом, можно сделать вывод о том, что процесс формирования гетерогенных структур даже в случае абсолютной симметрии внешних воздействий (круглая выработка, осесимметричное нагружение, однородный вмещающий массив) уже несет в себе неоднородную компоненту, которая заключается в спо-

собности геосреды, находится в различных фазах (состояниях) – упругой и пластической.

Указанные соображения, во-первых, полностью корреспондируются с аналитическими построениями [4, 5, 6] и, во-вторых, позволяют получить геомеханические условия "абсолютной" потери устойчивости массива. А именно, потеря устойчивости происходит при условиях, когда производная функции изменения энергии системы, в какой либо ее точке, больше нуля. Здесь абсолютность понимается в том смысле, что рассмотрены наиболее неблагоприятные (полная симметрия) с точки зрения потери устойчивости условия. Опуская достаточно объемные выкладки, запишем следующее критериальное соотношение:

$$\nu \leq \frac{K \cos(\rho)}{\gamma H (1 - \sin(\rho))}, \quad (5)$$

Заметим, что выражение (5) впервые увязывает деформационные и прочностные характеристики горных пород как в упругом, так и в пластическом состоянии. Данное выражение можно переписать в несколько менее удобной для анализа, но очень простой форме:

$$2\nu\gamma H \leq R_c, \quad (6)$$

где R_c – прочность пород на одноосное сжатие.

Итак, если условие (6) выполняется, то имеет место устойчивое состояние. В противном случае массив устойчивость теряет и его деформирование идет неоднородным путем согласно модели (1, 2).

На взгляд автора изложенный подход является весьма перспективным при анализе формирования и эволюции напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и может служить основой для разработки новых эффективных способов и средств повышения устойчивости.

ВЫВОДЫ

1. Процесс деформирования гетерогенных структур даже в случае абсолютной симметрии внешних воздействий (круглая выработка, осесимметричное нагружение, однородный вмещающий массив) уже несет в себе неоднородную компоненту, которая заключается в способности геосреды, находится в различных фазах (состояниях).

2. Полученный критерий впервые увязывает физико-механические характеристики горных пород, как в упругом, так и в пластическом состоянии.

3. Полученные результаты дают возможность целенаправленно разрабатывать конструктивно-технологические мероприятия, обеспечивающие охрану и поддержание горных выработок, находящихся в сложных горно-геологических условиях.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Driban, V. New approach to assessment of mine working stability [Text] / V. Driban // 7-th International Scientific Conference Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection SGEM - Albena, (Bulgaria). – 2007. – P. 251 – 259.
2. Driban, V. On the problem of mine working stability [Text] / V. Driban // Форум гірників – 2007 - Дніпропетровськ, (Україна). – 2007. – с. 35 – 41.
3. Driban, V. On the new approach to the problem of maintenance mine workings [Text] / V. Driban // 21th World Mining Congress “New Challenges and Visions for Minings” – Krakow (Poland). – 2008. – P. 65 – 72.
4. Дрибан В. А. Расчет жесткой замкнутой крепи горных выработок на основе представлений о консервативности системы "крепь-массив" // Проблеми гірського тиску. – Донецк: ДонНТУ. – 1999. – № 3. - С. 64 – 74.
5. Driban, V. Shaft massif and shaft lining stability [Text] / V. Driban // 20th World Mining Congress “Mining and Sustainable Development” – Tehran (Iran). – 2005. – P. 669 – 672.
6. Дрибан В. А. Критерий устойчивости крепи шахтных стволов

// Сборник докладов международной научно-технической конференции "Горная геология, геомеханика и маркшейдерия". – Донецк: УкрНИМИ. – 2004. – Ч. 2. – С. 314 – 319.