

УДК 622.834:622.268

ОБ ОДНОМ ПУТИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Дрибан В. А.

(УкрНИМИ НАН Украины г. Донецк, Украина)

Based on the analysis of experimental data and the obtained new solutions on distribution of stress fields and deformations around mine workings it is determined that in complicated mining and geological conditions formation of the zones of irreversible deformations occurs with the formation of wedge-shaped areas of direct tensile stresses.

На основі аналізу експериментальних даних і одержаних нових розв'язань про розподіл полів напружень і деформацій навколо виробки встановлено, що за складних гірничо-геологічних умов формування зон необоротних деформацій відбувається з утворенням клиноподібних областей розтягальних нормальних напружень.

Знание механизмов формирования НДС массива горных пород является ключевым вопросом горной геомеханики. В то же время, существующие на данный момент методы прогноза и оценки параметров НДС представляют собой набор разрозненных методик расчета отдельных видов деформаций, применимых, как правило, в ограниченных условиях конкретных регионов и в подавляющем большинстве случаев носят сугубо эмпирический характер. Данная ситуация во многих случаях не позволяет получить даже качественную картину распределения НДС массива горных пород. Собственно говоря, именно поэтому механизмы формирования НДС массива вокруг выработок, нагрузок на крепь и разработка методов оценки устойчивости и обеспечения экс-

плуатационного состояния всего комплекса горных выработок на протяжении многих лет являются предметом многочисленных дискуссий и поисков.

Анализ экспериментальных данных показывает, что потеря устойчивости горных пород сопровождается образованием зон предельного состояния, где проявляются упругие и пластические свойства тел, которые в дальнейшем разрушаются в условиях неоднородных объемных напряженных состояний. Таким образом, поведение зоны неупругих деформаций в зависимости от изменения общего напряженного состояния массива, характеристик устанавливаемой крепи, а также истории ее нагружения, и определяет устойчивость всей системы "крепь – массив" в целом. При этом ключевыми вопросами с точки зрения обеспечения охраны и поддержания горных выработок, является выработка критериев, определяющих устойчивость упругопластической системы в целом и выбор параметров крепления адекватных сложившимся геомеханическим условиям.

В тоже время, необходимо отметить, что применение стандартных подходов к анализу устойчивости геомеханических систем не дает удовлетворительных результатов и содержит внутренние противоречия. На взгляд автора, основным источником указанных противоречий является механистический перенос основных подходов и соотношений теории сплошных сред на поведение геоматериалов. А также перенос классических определений потери устойчивости с упругих систем на упругопластические. Как правило, использовался следующий подход. А именно, решалась 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 по-

требностям практики. При этом оптимистично предполагается, что полученные поля напряжений с удовлетворительной точностью описывают реальную ситуацию

В тоже время, расчеты с реальными физико-механическими параметрами горных пород приводят к смещениям контура выработок порядка десятков миллиметров, в то время как, фактически наблюдаемые смещения на 1-2 порядка выше. Именно это обстоятельство практически вынудило исследователей выстраивать многочисленные деформационные модели (зачастую весьма сложные и тонкие) с введением, вообще говоря, не оправданных допущений [1 – 7]. Например, уменьшение прочности вмещающего массива при приближении к контуру выработки в 50-100 раз; увеличение коэффициентов дилатации, фактически без увязки с историей нагружения, и уровнем возникающих напряжений и многие другие. 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. Более того, при построении деформационных моделей игнорируется то факт, что искажения контура выработок достигают десятков процентов и, соответственно, построение моделей в рамках теории "малых деформаций" становится, по всей видимости, не вполне корректным.

Отличие, которое наиболее серьезно сказывается на расхождении результатов, связано с различными подходами к назначению остаточной прочности пород на контуре выработки в зоне неупругих деформаций. Введение остаточной прочности, по сути, связано с попыткой распространить условие прочности Кулона-Мора на случай запредельных деформаций. 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, связанные с априорным введением зон разрушения и трещиноватости вокруг выработки, к сожалению, не имеют удовлетворительных физических обоснований их образования и требуют, в каждом конкретном случае, большого объема

испытаний образцов горных пород. Данный подход не только практически не реализуем на стадии прогноза, но и ставит под сомнение получаемые результаты, поскольку последние существенно зависят от выбранных интерпретационных моделей.

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 оценке устойчивости упругопластических систем.

Эффект потери устойчивости механической системы, медленно нагружаемой некоторыми силами, состоит, как правило, в появлении таких видов деформаций, которые в идеале не могут возникнуть без действия добавочной системы возмущающих сил. Именно поэтому в основе определения устойчивости лежит концепция проб малыми дополнительными силами. Интуитивно ясно, что механическую систему нужно признать неустойчивой, если при действии ничтожных дополнительных сил в ней могут возникнуть конечные деформации выпучивания. Классическое определение устойчивости исходит из указанного выше и состоит по существу в следующем. Состояние механической системы является неустойчивым, если при действии как угодно малых возмущающих сил возникающее возмущенное движение будет расходиться от исходного. В противном случае состояние системы считается устойчивым.

Прямые исследования возмущенных движений простейших упругих конструкций и многочисленные эксперименты подтвердили, что сформулированный выше критерий действительно определяет границу устойчивых состояний. Таким образом, если наряду с исходным невозмущенным состоянием есть равновесное возмущенное состояние, поддерживаемое теми же внешними силами, то соответствующее значение параметра нагружения является критическим в том смысле, что оно разграничивает области устойчивых и неустойчивых состояний упругой системы (исходная форма критерия Эйлера).

Как видно из указанного определения, задача устойчивости сводится к исследованию возможности существования нескольких форм равновесия. Однако поскольку при достижении критического значения параметра нагружения в упругих системах существует непрерывная последовательность равновесных состояний, включающих исходное, то формальность задачи только видимая, а критерий устойчивости следует переформулировать в бифуркационной форме. Если возможен равновесный переход из исходного состояния в некоторое другое (бифуркация равновесия) при неизменных внешних силах, то состояние упругой системы неустойчиво.

В подавляющем большинстве работ по оценке устойчивости упругопластических систем в основу отыскания критических сил был положен тот же критерий Эйлера в классической формулировке. При этом во главу угла ставилось развитие методов расчета, а трудностям, которые возникают при логическом обосновании применимости данного критерия в области упругопластических деформаций, за исключением, вообще говоря, единичных работ внимания уделяется мало. Тем не менее, эти трудности значительны. Действительно, уже то предположение, которое в упругости было оправданным, что в исходном состоянии (устойчивость которого исследуется) отсутствуют деформации выпучивания, в силу необратимости деформаций любое воздействие дополнительных сил приведет к появлению остаточных деформаций, и практически трудно представить, что к рассматриваемому моменту они исчезнут. Указанные соображения могут привести к принципиальной невозможности постановки задачи устойчивости при упругопластических деформациях. Точнее, к тривиальному выводу о том, что любое упругопластическое состояние является неустойчивым, что не отвечает действительности. Данный факт в скрытом виде нашел свое отражение в целом ряде капитальных работ, посвященных проблеме устойчивости горных выработок и вертикальных стволов, где в качестве критерия устойчивости было предложено следующее соотношение: прочность вмещающих пород в два и более раз выше, чем вертикальное давление. Данный критерий полностью соответствует условию возникновения пластической зоны вокруг круглой выработки при

решении упругопластической задачи с прямолинейной огибающей Кулона – Мора. При этом глубину потенциального вывала предложено определять как размер зоны пластических деформаций. Заметим, что полученные критерии попросту не соответствуют горной практике, ибо их следствием является вывод о том, что в подавляющем большинстве случаев неустойчивое состояние наступает при глубинах более 400 – 600 м (вертикальные давления 10 – 15 МПа). С другой стороны ясно, что поскольку для упругопластических систем, также как и для упругих, существуют состояния, включенные в непрерывную последовательность равновесных с фиксированными внешними силами состояний, то возможно в каком-то смысле перенесение бифуркационного критерия Эйлера в упругопластическую область.

Благодаря усилиям многих исследователей и, в первую очередь, В. Д. Ключникова и Ю. Н. Работнова, в результате прямого анализа возмущенных движений конкретных упругопластических систем было показано, что явление упругопластического деформирования вовсе не связано с потерей устойчивости состояния равновесия, как это имеет место в упругих телах, а есть следствие потери устойчивости движения частиц тела в процессе его деформирования. В соответствии с этим поиски правила определения критических сил в области упругопластических деформаций должны быть направлены на отыскание аналога критерия эйлеровского типа в теории устойчивости движения.

Идея заключается в том, что если при решении задачи о бифуркации состояния системы выделяются значения внешних параметров, при которых становятся возможными разные, но бесконечно близкие значения внутренних параметров, то в рамках пластичности появляется дополнительная иная возможность определения характерных значений внешних параметров. А именно, при рассмотрении упругопластической задачи в приращениях можно выделить такие значения, которые отвечают неединственности решения системы уравнений для приращений.

Здесь необходимо сделать ряд замечаний. Поскольку процесс деформирования является следствием движения материальных частиц, то устойчивость естественно понимается, как устойчивость бесконечно медленного движения. Однако в противопо-

ложность классическим задачам устойчивости движения, характерным для теоретической механики, на первый план выступают не свойства инерционности, а природа связей, в качестве которых выступают определяющие соотношения пластичности, эквивалентные в какой-то мере меняющимся связям с сухим трением. Именно это обстоятельство позволяет отказаться от постулата о непрерывной зависимости параметров, определяющих движение системы в данный момент, от таковых в любой предыдущий конечно удаленный момент. В соответствии с этим появилась возможность определить понятие неустойчивости движения даже более эффективным, чем по Ляпунову способом. Невозмущенное движение, начиная с данного момента, является неустойчивым, если исчезающее малое изменение параметров движения в данный момент времени приводит к конечному их изменению в любом последующем конечном временном интервале.

В соответствии с проведенными рассуждениями, рассмотрим задачу об устойчивости массива горных пород вокруг протяженной одиночной выработки в следующей постановке. Зона неупругих деформаций, образующаяся вокруг выработки, описывается уравнениями пластичности Кулона-Мора с прямолинейной огибающей. Будем искать поля напряжений вокруг выработки, изначально кругового сечения, контур которой подвержен определенным возмущениям. При этом, поскольку контур выработки потерял симметричность, то с необходимостью мы отказываемся от предположения о независимости распределения полей напряжений от полярного угла θ [8 - 10].

Итак, уравнение пластичности в полярных координатах имеет вид:

$$(\sigma_{\theta} - \sigma_r)^2 + 4\tau_{r\theta}^2 = \sin^2 \rho (\sigma_{\theta} + \sigma_r + 2K \operatorname{ctg} \rho)^2, \quad (1)$$

где K – сцепление горных пород;

ρ – угол внутреннего трения;

σ_r , σ_{θ} , $\tau_{r\theta}$ – радиальные, тангенциальные и касательные напряжения соответственно, удовлетворяющие условиям равновесия и представляемые через функцию напряжений $\Phi(r, \theta)$ следующим образом:

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \quad \sigma_\theta = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} \quad \tau_{r\theta} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right)$$

Поскольку нас интересуют состояния в определенном смысле "близкие" однородному симметричному случаю, где функция напряжений имеет степенной вид, то решение (1) будем искать в виде:

$$\Phi(r, \theta) = r^\alpha f(\theta) + \frac{r^2}{2} K \operatorname{ctg} \rho$$

Тогда (1) можно представить в следующей форме:

$$\left[(\alpha^2 - 2\alpha) f(\theta) - f''(\theta) \right] - 2i(\alpha - 1) f'(\theta) = \sin \rho \left[\alpha^2 f(\theta) + f''(\theta) \right] e^{i\varphi(\theta)}, \quad (2)$$

где $\varphi(\theta)$ – неизвестная вещественная функция.

Учитывая, что $f(\theta)$ – также вещественная функция, нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных сводится к следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} (\alpha^2 - 2\alpha) f(\theta) - f''(\theta) = \sin(\rho) \cos(\varphi(\theta)) \left[\alpha^2 f(\theta) + f''(\theta) \right] \\ -2(\alpha - 1) f'(\theta) = \sin(\rho) \sin(\varphi(\theta)) \left[\alpha^2 f(\theta) + f''(\theta) \right] \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, если нам удастся найти вещественные решения системы (3) и такой возмущенный контур на котором будет удовлетворяться условие равенства нулю нормальных напряжений, то мы получим искомое распределение полей напряжений вокруг выработки.

Опуская достаточно объемные преобразования, запишем полученные решения.

$$f(\theta) = \left(1 + \sin \rho \cos \varphi(\theta) \right) \left| 2 \left(1 + \sin \rho \cos \varphi(\theta) \right) - \alpha \cos^2 \rho \right|^{\frac{\alpha-2}{2}}, \quad (4)$$

где $\varphi(\theta)$ определяется следующим функциональным уравнением:

$$\varphi(\theta) = 2\theta + (2 - \alpha) \cos^2 \rho \times \begin{cases} \frac{2}{v} \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{wtg}(0.5\varphi(\theta))}{v} & \text{if } \alpha \notin \left(\frac{2}{1 + \sin \rho}; \frac{2}{1 - \sin \rho} \right) \\ \frac{2}{v} \ln \left| \frac{\operatorname{wtg}(0.5\varphi(\theta)) - v}{\operatorname{wtg}(0.5\varphi(\theta)) + v} \right| & \text{if } \alpha \in \left(\frac{2}{1 + \sin \rho}; \frac{2}{1 - \sin \rho} \right), \\ 0.5(\sin \rho)^{-1} \operatorname{ctg}(0.5\varphi(\theta)) & \text{if } \alpha = 2(1 - \sin \rho)^{-1}; \\ 0.5(\sin \rho)^{-1} \operatorname{tg}(0.5\varphi(\theta)) & \text{if } \alpha = 2(1 + \sin \rho)^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{где } v = \cos \rho \sqrt{4 - 4\alpha + \alpha^2 \cos^2 \rho} \quad w = [2(1 - \sin \rho) - \alpha \cos^2 \rho]$$

В настоящей работе рассмотрим более подробно случай, когда показатель степенной функции α совпадает с показателем степенной функции в случае однородной осесимметричной задачи. А именно $\alpha = 2(1 - \sin \rho)^{-1}$. Заметим, что при данном значении α помимо тривиального решения, соответствующего случаю $\varphi(\theta) = 0$ и описывающего однородную осесимметричную задачу, решения которой имеют вид:

$$\sigma_r = K \operatorname{ctg} \rho (r^{\alpha-2} - 1); \quad \sigma_\theta = K \operatorname{ctg} \rho ((\alpha - 1)r^{\alpha-2} - 1); \quad \tau_{r\theta} = 0, \quad (6)$$

появляется дополнительно целая серия решений, описывающих случай возмущенного контура и соответствующих функции $\varphi(\theta)$ определяемой следующим функциональным уравнением:

$$\varphi(\theta) + (1 + \sin \rho) \operatorname{ctg} \frac{\varphi(\theta)}{2} = 2\theta. \quad (7)$$

Указанное уравнение генерирует полубесконечный ряд гладких функций $\varphi_n(\theta)$, 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 ∞ .

Таким образом, в процессе деформирования массив последовательно проходит дискретный ряд состояний, отвечающих определенному соотношению физико-механических свойств массива и уровню горного давления [8 – 10]. Уравнения напряжений в массиве, соответствующих различным стадиям деформирования имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \sigma_r^{(n)} = C_1 r^\alpha (1 - \sin \rho \cos \varphi_n(\theta)) \left| \sin(0.5 \cdot \varphi_n(\theta)) \right|^\alpha - K \operatorname{ctg} \rho \\ \sigma_\theta^{(n)} = C_1 r^\alpha (1 + \sin \rho \cos \varphi_n(\theta)) \left| \sin(0.5 \cdot \varphi_n(\theta)) \right|^\alpha - K \operatorname{ctg} \rho \\ \tau_{r\theta}^{(n)} = C_1 r^\alpha \sin \rho \sin \varphi_n(\theta) \left| \sin(0.5 \cdot \varphi_n(\theta)) \right|^\alpha \end{cases}, \quad (8)$$

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 функция $\varphi_0(\theta)$ 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 может наступать потеря устойчивости, составляет 12 – 18 %.

Следует сказать, что, несмотря на то, что полученный деформационный критерий устойчивости горных выработок подтверждается сотнями прямых наблюдений за деформированием контура выработок, проведенных различными исследователями, где неустойчивое состояние наблюдается при достижении сме-

щений в діапазоні 200-500 мм, аналітичні побудови несуть декілька формальний характер. Діло в тому, що поява в аналітичних моделях "більших" деформацій, ічислюємих десятками відсотків, є найбільш принциповим в розумінні відбуваються процесів і вимагає доказів наявності відповідних шляхів і механізмів формування напружено-деформованого стану масиву навколо виробок. При цьому з найбільш загальних міркувань, очевидно, що утворення великих зміщень контуру виробки, пов'язано з появою не тільки розтягуючих деформацій, що цілком можливо в нерівнокомпонентному полі стискаючих напружень, але і розтягуючих напружень. Оскільки саме останні з урахуванням того, що межа міцності на розтягнення на порядок менше межі міцності на стиснення, можуть давати відповідні значення деформацій масиву.

Розглянемо вказаний питання більш детально. Ігноруючи перетворення, запишемо рівняння головних напружень:

$$\begin{cases} \sigma_1^{(n)} = C_1 r^\alpha (1 - \sin \rho) \left| \sin(0.5 \cdot \varphi_n(\theta)) \right|^\alpha - K \operatorname{ctg} \rho \\ \sigma_2^{(n)} = C_1 r^\alpha (1 + \sin \rho) \left| \sin(0.5 \cdot \varphi_n(\theta)) \right|^\alpha - K \operatorname{ctg} \rho \\ \sigma_{12}^{(n)} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

З (3), враховуючи, що на контурі виробки нормальні напруження рівні 0, легко отримати рівняння, що описують форми контурів виробки (з точністю до постійного множителя), що відповідають дискретним рівноважним станам:

$$r(\theta) = D_n \sin^{-1}(0.5 \cdot \varphi_n(\theta)). \quad (10)$$

Відзначимо, також наступне обставина. В класичному випадку, відповідному однорідній осесиметричній задачі поля напружень дуже чутливі до фізико-механічних параметрів вміщувачого масиву. В частині, при зміні кута внутрішнього тертя з 20 до 30° напруження на відстані від контуру рівній радіусу виробки змінюються в 3 рази, то полу-

ченные решения, наоборот, демонстрируют высокую степень устойчивости [11].

На рис. 1 – 6 показаны последовательные трансформации полей напряжений вокруг круглой выработки единичного радиуса в долях R_c (предела прочности вмещающих пород на одноосное сжатие) при переходах из одного равновесного состояния в другое (шаг 13 – 12; 3 – 2; 1 – 0 – потеря устойчивости). Для расчетов угол внутреннего трения принимался равным 20° . Темной областью выделен уровень сжимающих напряжений менее $0,1R_c$ (нулевые изолинии соответствуют контуру выработки).

На рисунках 1, 2 показана начальная стадия трансформирования зоны необратимых деформаций, когда осуществляется переход от состояния неустойчивого равновесия, соответствующего тривиальному решению осесимметричной упругопластической задачи, к дискретной последовательности равновесных состояний вмещающего массива.

Здесь мы наблюдаем картину близкую к центрально-симметричной. Однако, при сравнении изолиний при значениях оси абсцисс 1 и -1 (начальный контур выработки), уже визуально просматривается инверсия (поворот на 180°) сформированных полей напряжений.

Рассмотрим далее переход из состояния 3 в состояние 2 (рис. 3, 4). На этих стадиях асимметрия напряжений выражена более ярко. Так изменение величин нормальных напряжений сжатия на расстоянии 0,5 от условного контура выработки вдоль оси симметрии составляют 0,5 – 0,9 и 0,6 – 1,1 R_c , тогда как в классическом случае [5 – 7] симметричного распределения напряжений равны и составляют приблизительно 50 % от прочности пород на одноосное сжатие.

Предпоследняя стадия 1 (рис. 5) сопровождающаяся значительными смещениями контура выработки порядка 5 – 8 % что, например, для типовой выработки эквивалентного радиуса 2 м составляет 100 – 160 мм. На данной стадии наблюдается кардинальное изменение напряженно-деформированного состояния вмещающего массива, что связано с видоизменением сечения выработки с выпуклой формы на вогнутую с характерным появлением "клина вдавливания". Отметим, что подобный эффект, рас-

сматриваемый как процесс образования складок, неоднократно наблюдался различными авторами в шахтных условиях [12 – 17]. При этом на решающее значение факта образования складок при потере устойчивости горных выработок было впервые обращено внимание в работах проф. Назимко В. В.

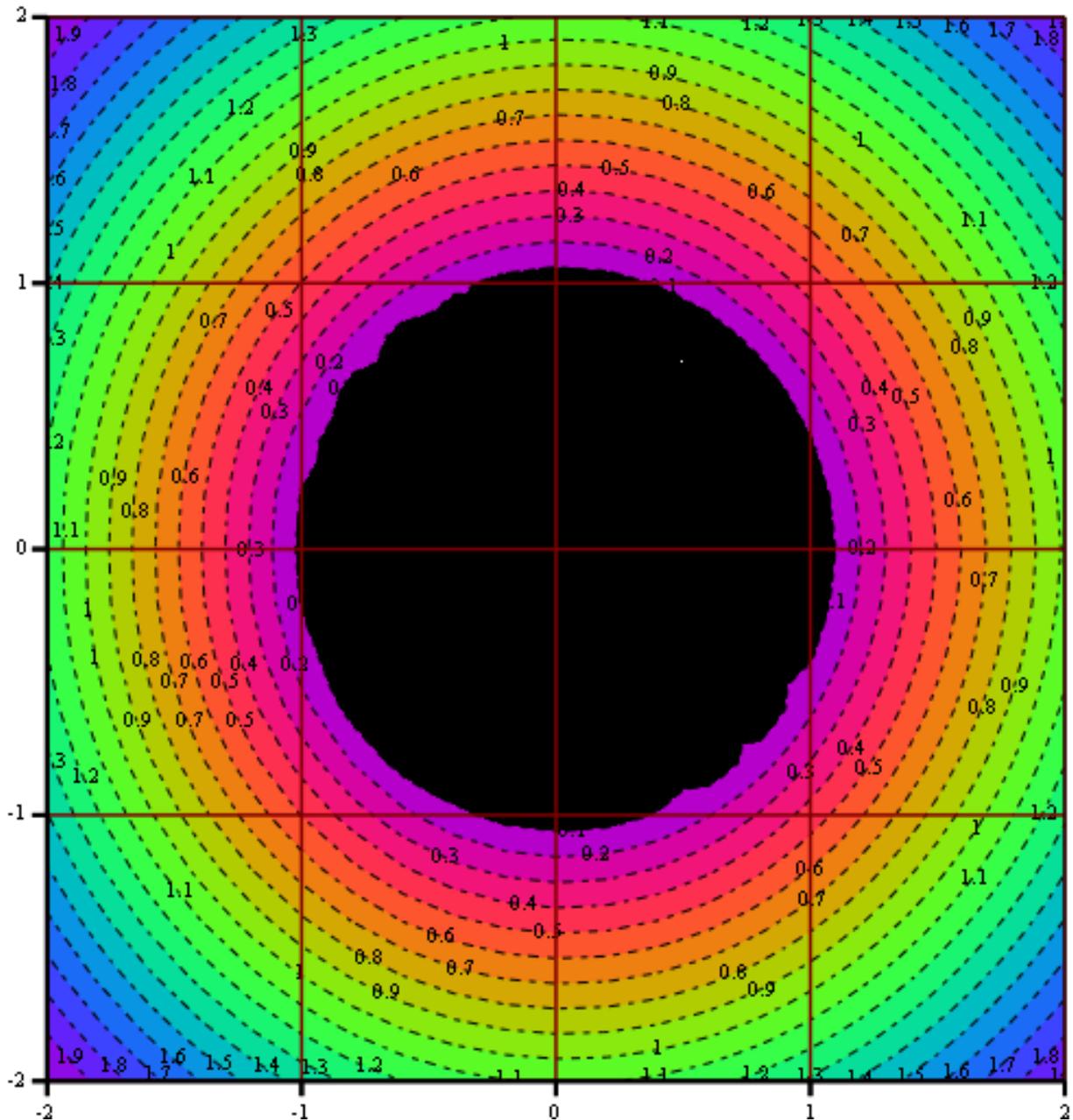


Рис. 1. Изолинии нормальных главных напряжений вокруг круглой выработки за 13 шагов до потери устойчивости

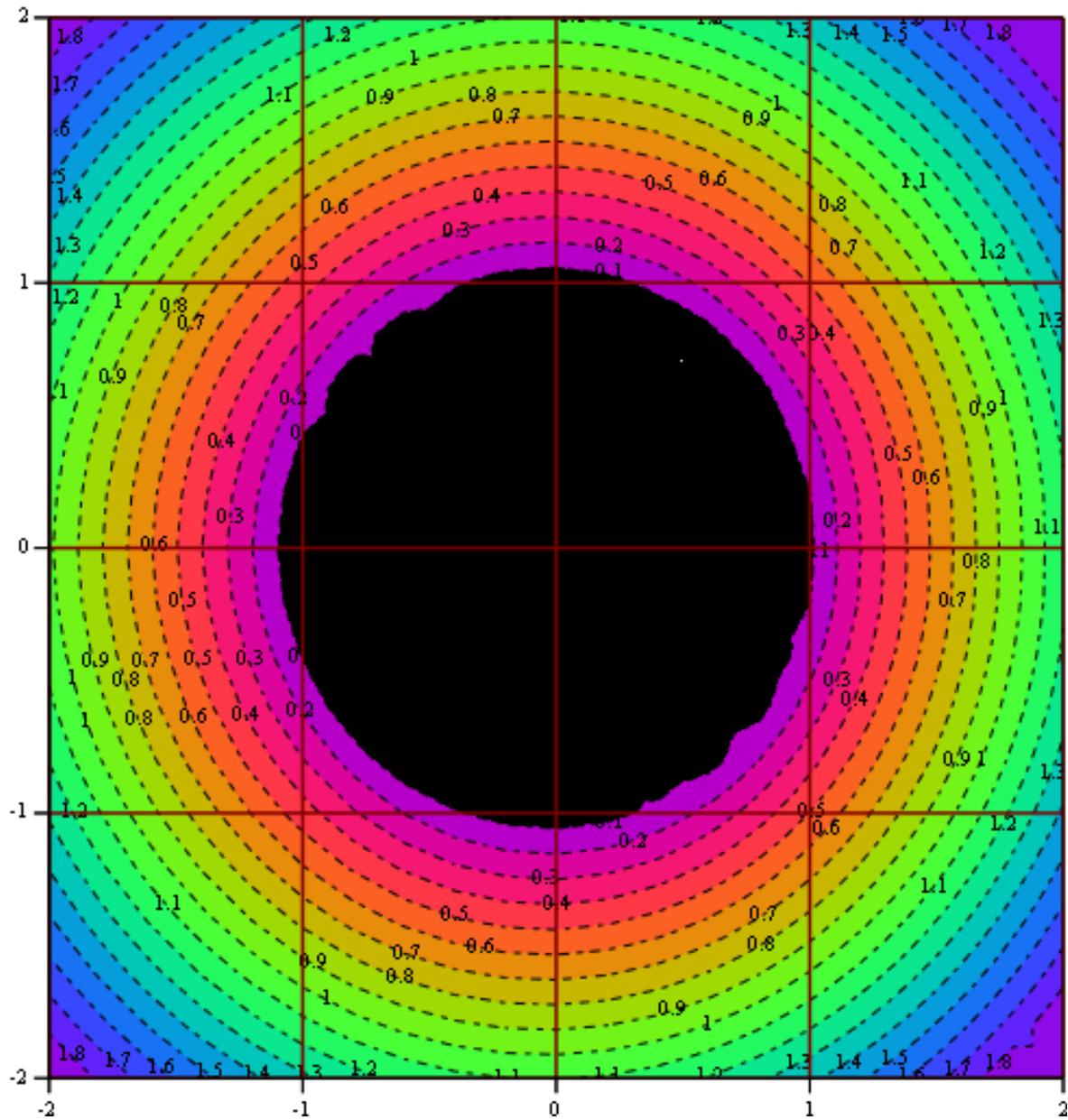


Рис. 2. Изолинии нормальных главных напряжений вокруг круглой выработки за 12 шагов до потери устойчивости

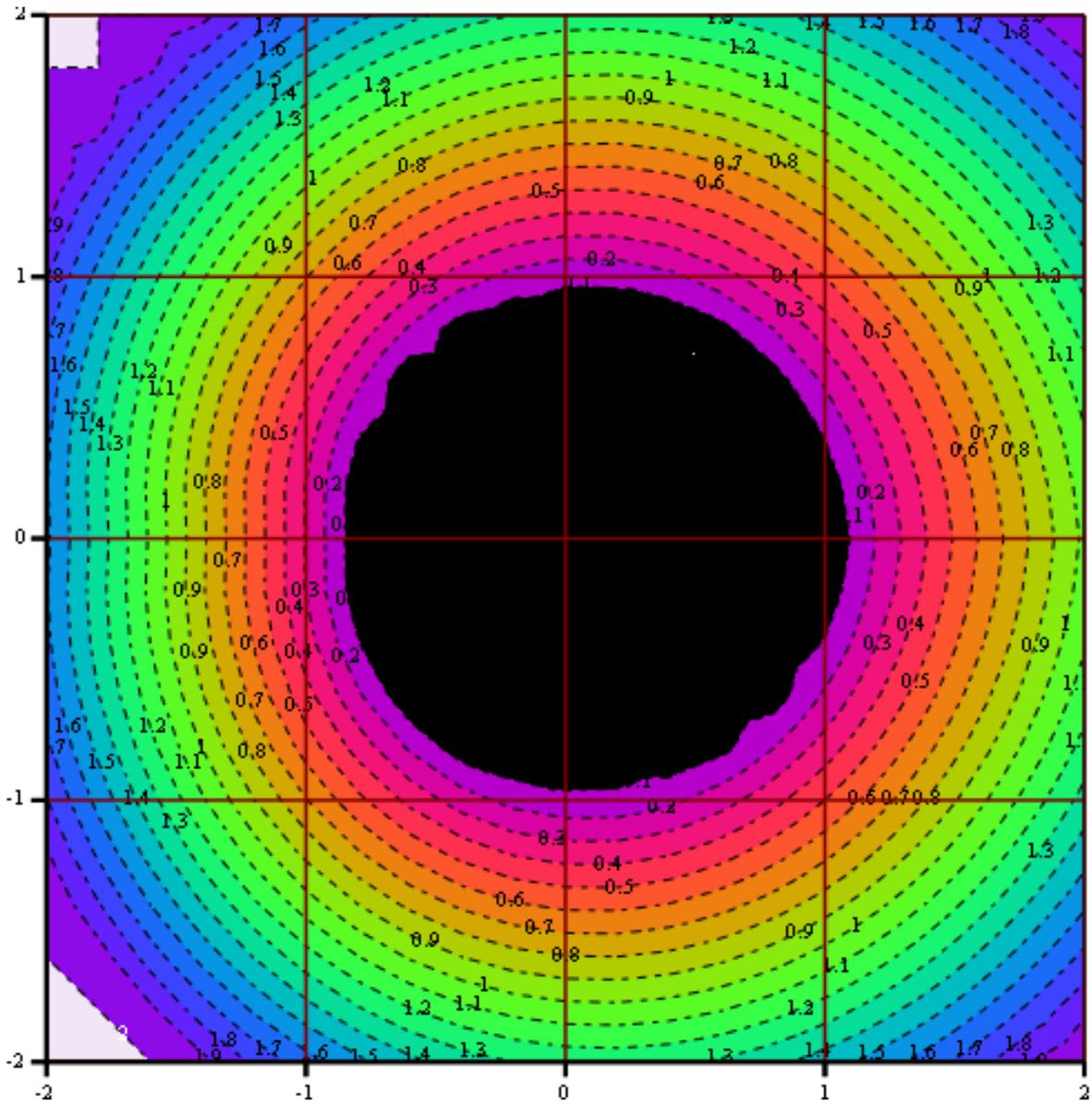


Рис. 3. Изолинии нормальных главных напряжений вокруг круглой выработки за 3 шага до потери устойчивости

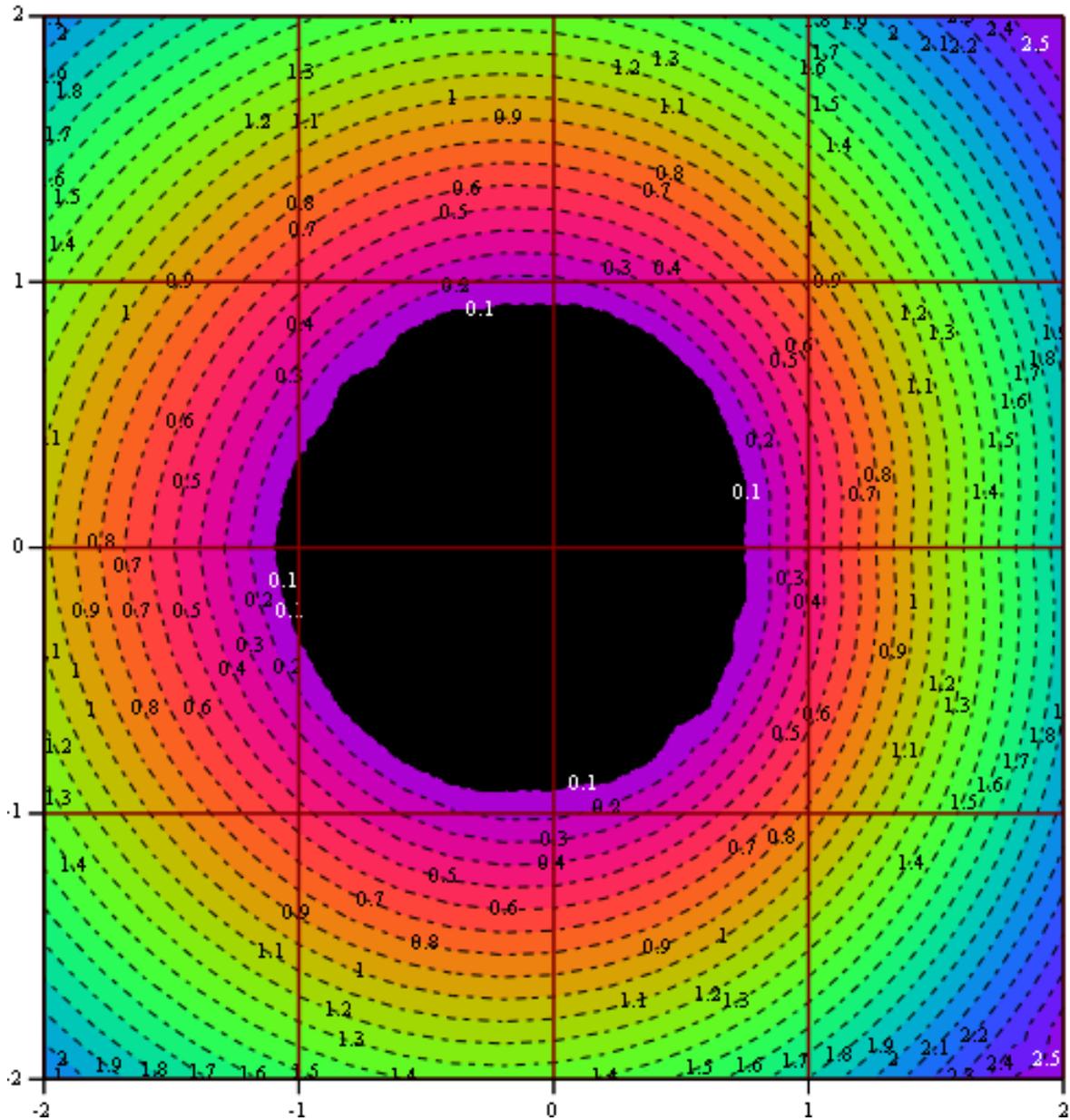


Рис. 4. Изолинии нормальных главных напряжений вокруг круглой выработки за 2 шага до потери устойчивости

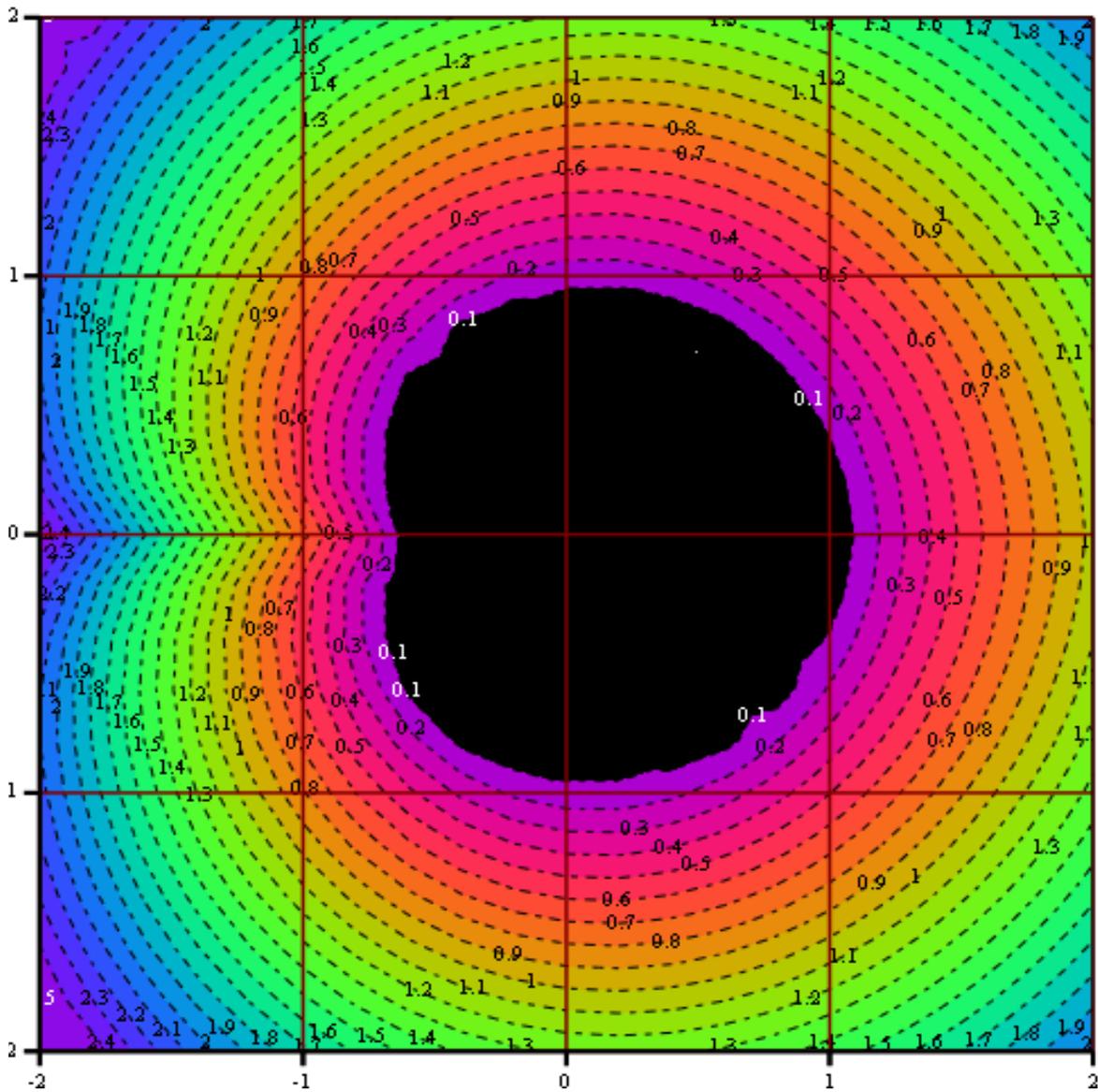


Рис. 5. Изолинии нормальных главных напряжений вокруг круглой выработки за 1 шаг до потери устойчивости

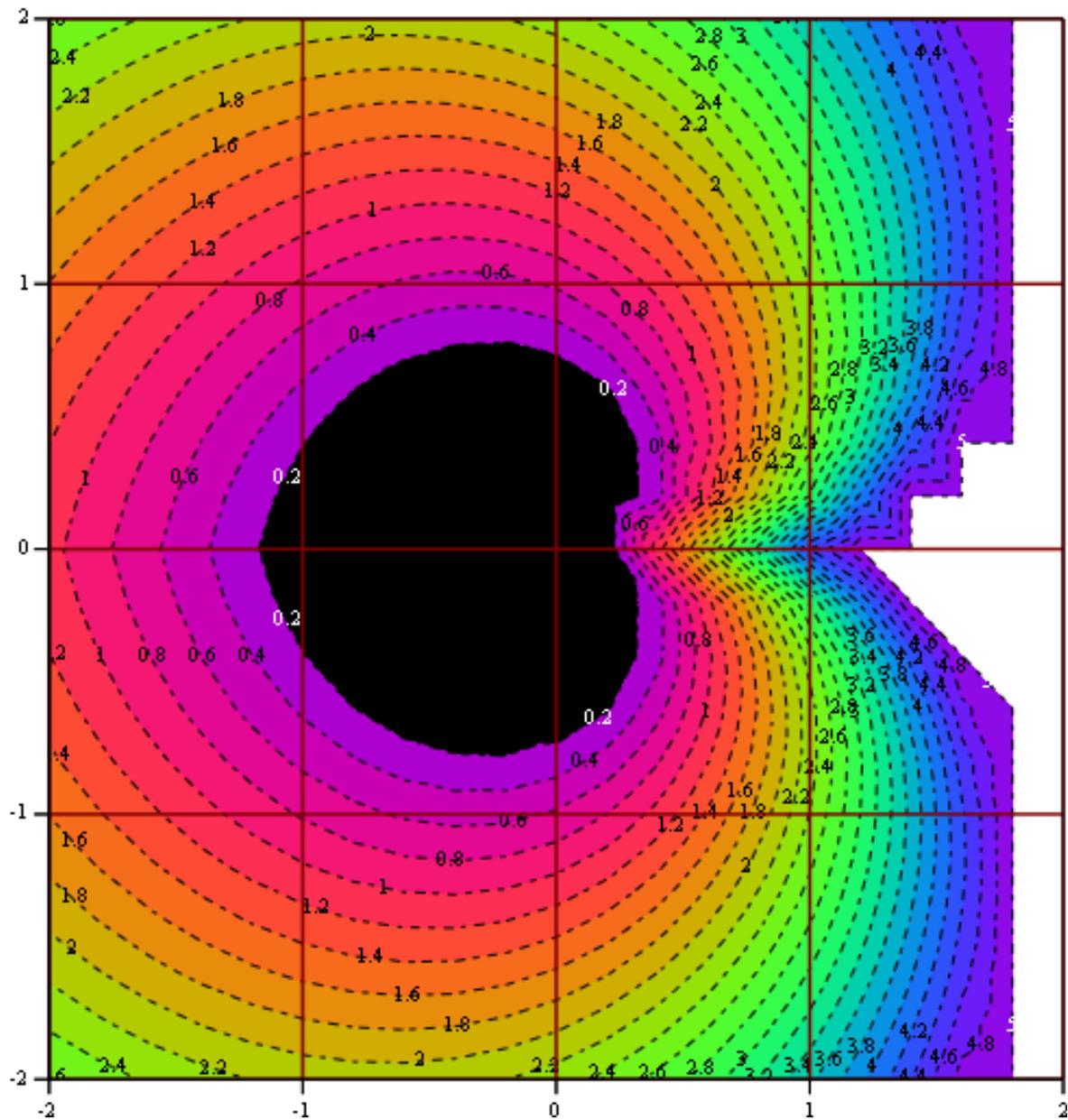


Рис. 6. Изолинии нормальных главных напряжений вокруг круглой выработки на стадии потери устойчивости (стадия 0)

И, наконец, появление точки бифуркации (стадия 0 – рис. 6.), что соответствует строгому пониманию термина "потеря устойчивости". В этом случае смещения контура выработки достигают 300 – 500 мм и более и наблюдается ярко выраженный "клин вдавливания", расположенный со стороны противоположной предшествующему состоянию. При этом перепад нормаль-

ных сжимающих напряжений измеряется уже единицами прочности на одноосное сжатие.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что процесс потери устойчивости выработки инициируется формированием и попеременным вдавливанием двух клиновидных областей вмещающего массива. Чисто геометрически этот процесс выглядит, как образование складок.

Следует сказать, что данный вывод, основанный на построенной аналитической модели, подтверждается рядом прямых наблюдений в цитированных выше работах, где была предпринята попытка объяснения указанного эффекта с самых общих позиций. А именно, достаточно абстрактного принципа Ле-Шателье, где, в частности, постулируется, что самоорганизация необратимых процессов идет в сторону, препятствующую развитию процессов разрушения (необратимости). Не возражая, против качественной картины изучаемого явления, отметим, что ответа на вопрос о физических механизмах образования областей вдавливания и появления растягивающих напряжений дано не было.

Рассмотрим указанный вопрос более подробно. Разработанная модель формирования зоны необратимых деформаций дает возможность анализа возмущений полей напряжений при переходе от одного дискретного равновесного состояния к следующему. На рис. 7 – 9 представлены изолинии полей возмущений (шаг 13 – 12; 3 – 2; 1 – 0 – потеря устойчивости) в долях прочности вмещающих пород на одноосное сжатие.

На рис. 7 показана начальная стадия изменения полей напряжений вокруг круглой выработки (на переходе от 13-ой стадии к 12-ой). Естественно поля возмущений "малы", однако обладают характерной особенностью. А именно, даже на столь ранней стадии зарождается область нормальных растягивающих напряжений. Учитывая, тот факт, что прочность горных пород на растяжение приблизительно на порядок ниже, чем на сжатие, это наблюдение носит принципиальный характер. Действительно, если в области всестороннего сжатия, требуется дополнительный достаточно тонкий анализ выделения возможных областей растягивающих деформаций и зон разрушения пород, то в областях

характеризуються растягивающими главными нормальными напряжениями и сжимающими главными тангенциальными, появление деформаций растяжения и, соответственно, зон разрушения носит безусловный характер. Для выделения областей разрушения (расслоения) горных пород был принят следующий критерий: прочность пород на одноосное растяжение равна $0,1R_c$, что вполне согласуется с данными экспериментальных исследований $R_p = 0,05 \div 0,15R_c$. На рис. 7 эта область расположена слева и выделена густым черным цветом. Ее можно охарактеризовать как зарождение "клина вдавливания", а с точки зрения прямых натурных наблюдений она будет выглядеть, как некий едва заметный прогиб пород в выработку.

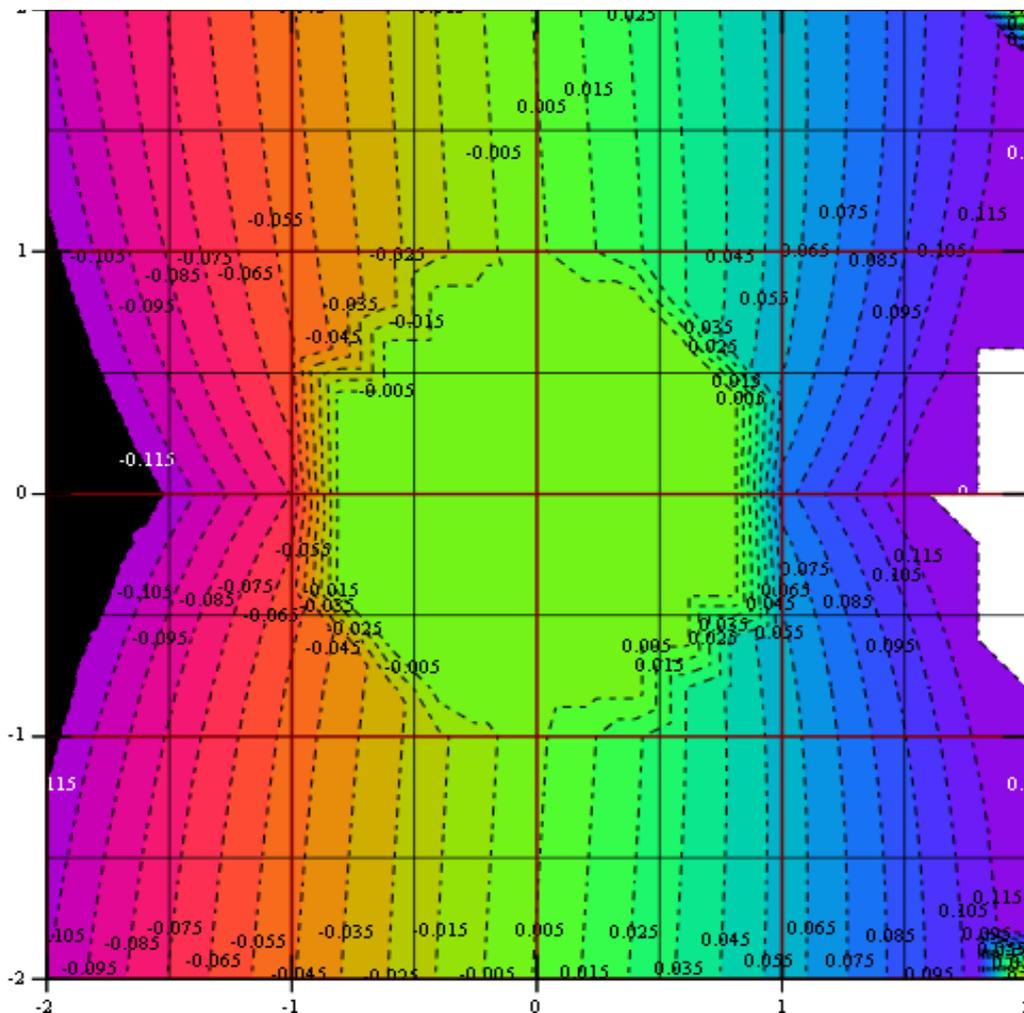


Рис. 7. Изолинии возмущений нормальных главных напряжений вокруг круглой выработки (шаг 13 – 12)

Рассмотрим далее возмущения нормальных напряжений при переходе 3–2.

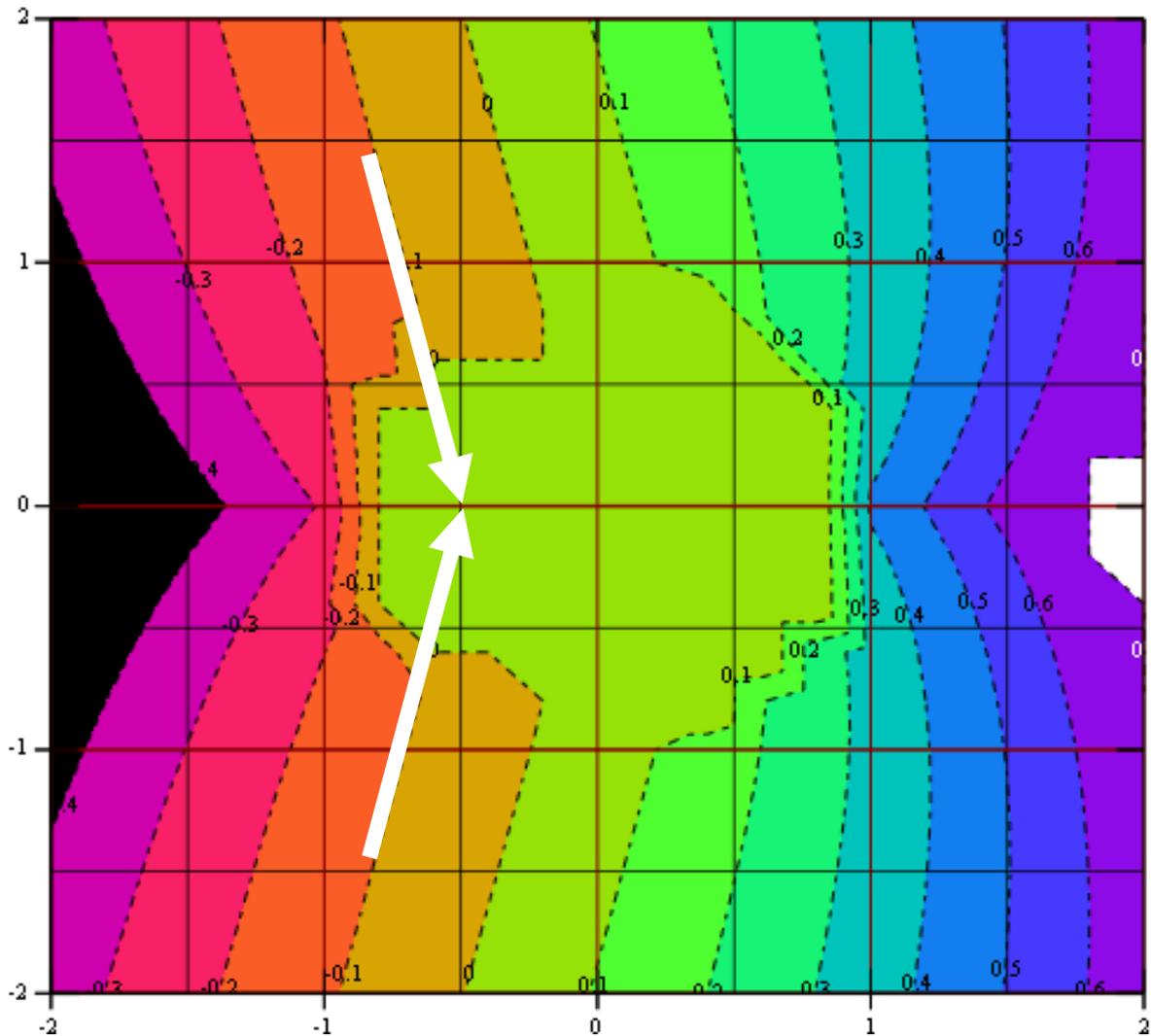


Рис. 8. Изолинии возмущений нормальных главных напряжений вокруг круглой выработки (шаг 3 – 2)

На рис. 8 область разрушенных пород выделяется более четко. Белыми стрелками отделена область массива пород, разрушенных от растягивающих напряжений. Смещения контура выработки составляют 50 – 80 мм. Совместный анализ распределений возмущений полей напряжений (рис. 7, 8) позволяет заключить следующее. Во-первых, зона разрушенных (расслоенных) пород формируется из глубины массива, последовательно приближаясь к контуру выработки, и сопровождается развитием зна-

копеременных деформаций, которые чередуются по разные стороны выработки. Во-вторых, до стадии предваряющей потерю устойчивости выработки, формирующийся "клин вдавливания" носит достаточно слабо выраженный характер с углом порядка $140 - 150^\circ$, что геометрически можно охарактеризовать как относительно небольшой прогиб.

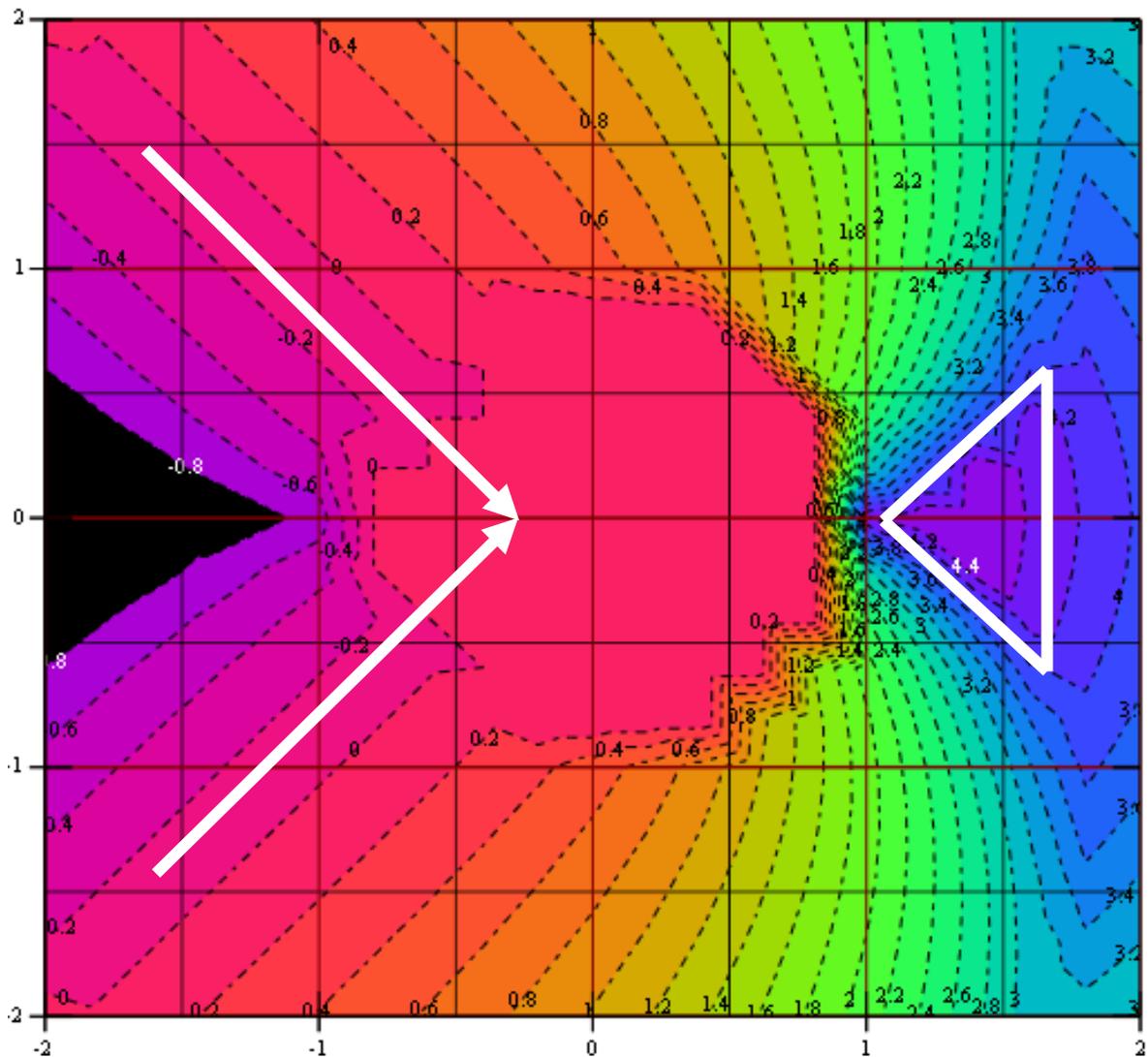


Рис. 9. Изолинии возмущений нормальных главных напряжений вокруг круглой выработки на стадии потери устойчивости

Последний этап – возмущение полей напряжений, приводящее к потере устойчивости (рис. 9). Абсолютно четко выделяется характерный ярко выраженный "клин вдавливания" с углом $90 - 100^\circ$ (выделенный белыми стрелками) и дополнительно можно отметить область уплотнения (перемятых пород) (выделена треугольником), где перепад нормальных главных напряжений сжатия составляет более $4R_c$. В этом случае смещения контура выработки, как правило, превышают 500 мм.

Более детальный анализ полученных аналитических соотношений и перераспределения возмущений полей напряжений в процессе развития зоны необратимых деформаций вокруг горных выработок, позволяет отметить следующее. В зависимости от тяжести горно-геологических и геомеханических условий деформирование вмещающего массива при потере устойчивости может проходить по двум внешне близким схемам, но требующим, по всей видимости, различных инженерных решений. Первая (мягкая) рис. 10 [12] – потеря устойчивости сопровождается формированием тупого "клина вдавливания" с углом раскрытия $140 - 150^\circ$, внутри которого происходят расслоения пород, как правило, по нормали к напластованию с сохранением структуры пород. В этом случае для обеспечения устойчивости, по всей видимости, достаточно предварительное усиление массива, например, путем установки анкеров в точно выбранном направлении.

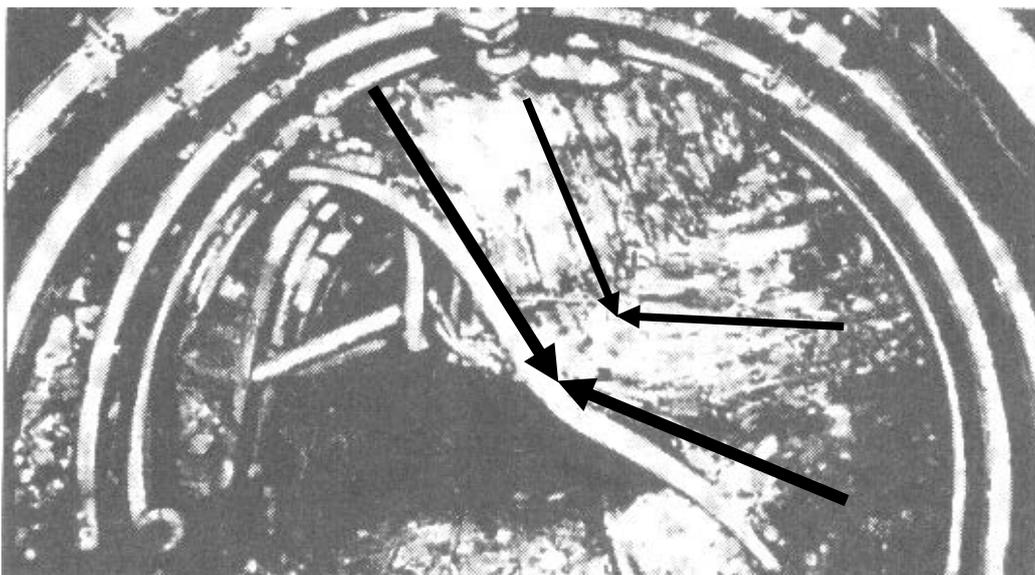


Рис. 10. Потеря устойчивости по первой схеме

Вторая (жесткая) рис. 11 – потеря устойчивости сопровождается формированием "клина вдавливания" с углом раскрытия близким к прямому, с образованием внутри клина ядра перемятых уплотненных пород с полной потерей структуры. При этом со стороны противоположной основному смещению, появляется дополнительное вдавливание, соответствующее предыдущей стадии деформирования. В этом случае для обеспечения устойчивости выработки, по всей видимости, простого механического воздействия недостаточно. Требуется мероприятия по управлению напряженно–деформированным состоянием массива, например, локальная разгрузка либо изменение физико-механических свойств



Рис. 11. Потеря устойчивости по второй схеме

ВЫВОДЫ

1. Как представляется автору, предложенная модель формирования зоны необратимых деформаций вокруг горных выработок, в рамках строгого подхода к понятию устойчивости, адекватно на численном уровне описывает механизм потери устойчивости вмещающего массива.

2. Показано, что в процессе своего развития изменение напряженно-деформированного состояния массива вокруг выработок происходит скачкообразно, последовательно проходя дискретный ряд равновесных состояний, отвечающих определенному соотношению физико-механических свойств вмещающих пород и уровню горного давления. Данное обстоятельство коренным образом меняет устоявшиеся представления о процессах формирования и эволюции напряженно-деформированного состояния в массивах горных пород.

3. 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, находиться в различных фазах (состояниях).

4. Установлены механизмы потери устойчивости горных выработок и получены численные параметры полей напряжений и деформаций в зоне неупругих деформаций, что позволяет разрабатывать целенаправленные мероприятия по повышению устойчивости горных выработок для различных геомеханических условий их поддержания.

5. Из проведенных построений следует, по крайней мере, два ясных, доведенных в некоторых случаях до практического применения направления повышения устойчивости горных выработок путем точечных воздействий. А именно, укрепление локальных областей массива, например, анкерованием и перераспределение напряженного состояния массива вокруг выработок с помощью полостей ослабления.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Линьков А.М. Запредельные характеристики пород и устойчивость горных выработок // Актуальные проблемы нелинейной механики сплошных сред. – Л.: Изд. ЛГУ. – 1977. – С. 7 – 21.
2. Линьков А.М. Об определении опорного давления и оценках устойчивости краевых частей пластов и целиков с учетом за-предельных деформаций // Физико-технические проблемы горного производства. – 1978. – № 6. – С. 3 – 7.
3. Линьков А.М. Учет запредельных состояний в плоской задаче о круглой выработке // Физико-технические проблемы горного производства. – 1977. – № 3. – С. 16 – 22.
4. Амусин Б.З., Линьков А.М. Учет истории нагружения крепи при ее взаимодействии с массивом горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1983. – № 5. – С. 94 – 96.
5. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. – М.: Недра, 1979. – 301 с.
6. Протосеня А.Г., Ставрогин А.Н., Черников А.К., Тарасов В.Г. К определяющим уравнениям состояния при деформировании горных пород в запредельной области // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1981. – № 3. – С. 33 – 43.
7. Протосеня А.Г., Ставрогин А.Н., Черников А.К., Тарасов В.Г. Запредельное состояние горных пород и его связь с задачами неоднородной теории пластичности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1979. – № 6. – С. 3 – 9.
8. 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.
9. Driban, V. On the of mine working stability [Text] / V. Driban // Форум гірників – 2007 - Дніпропетровськ, (Україна). – 2007. – с. 35 – 41.
10. 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 Minigs” – Krakow (Poland). – 2008. – P. 65 – 72.
11. Дрибан В.А.. Об одном подходе к оценке устойчивости массива горных пород вокруг выработок / Зб. наук. пр. УкрНДМІ НАНУ.– Донецьк, 2010. – № 7 – С. 211 – 223.
 12. Mogk E., Kulassek M. Bergbehordliche anforderungen fur den einsatz von ankerausbau im bergamtsbezirk moers /- Ankersbau im bergbau roofbolting in mining, Aachen, 1995. – P. 9 – 17.
 13. Nazimko V.V., Peng S.S., Lapteev A.A., Alexandrov S.N., Sazhnev V.P. Damage mechanics around a tunnel due to incremental ground pressure // 36th U.S. Rock Mechanics Symposium. – 1997. – P. 34 – 36.
 14. Nazimko V.V., Lapteev A.A., Sazhnev V.P., Naprasnikov S.V., Alexandrov S.N., Ivanov I.E. Longwall Panel Roof Stability Assessment // International conference on Geomechanics/Ground Control in Mining and Underground Construction. – Wollongong: NSW, Australia. – 1998. – P. 599 - 608.
 15. Аналіз закономірностей розвитку зон руйнування навколо підготовчої виробки при впливі очисних робіт з урахуванням ефекту саморозклинювання порід / С.М. Александров, В.П. Сажнів, Красько М.І., Напрасніков С.В. // Проблеми гірського тиску. – Донецьк: “СПЕКТР”, 2001. – № 6. – С. 48 – 72.
 16. Копылов А. Ф., Назимко В. В. Механизмы деформирования надрабатываемых выработок // Уголь Украины. - 1994 – № 5. – С. 10 – 12.
 17. Назимко В. В. Механизм сдвижений пород в окрестности полевой выработки // Уголь Украины. – 1988 – № 10. – С. 8 – 9.