

РАСЧЕТ ПЛАСТИЧЕСКОГО РАЗДРОБЛЕНИЯ МАССИВА АНИЗОТРОПНОГО СТРОЕНИЯ ВОКРУГ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

THE CALCULATION OF THE PLASTIC FRAGMENTATION OF THE ARRAY OF ANISOTROPIC STRUCTURE AROUND THE MINE WORKINGS

*A. Sejnasinova
G. Rysbaeva
S. Avdarsolkyzy
R. Bajmahan*

Annotation

Abstract: this article discusses the issues of research of laws of formation of locally scattered plastic zones around mining various deep Foundation in the ore bed, which itself is in turn in the mountain range obliquely layered anisotropic structure. In this paper we propose a generalized criterion for ductile failure Coulomb–Mohr, allowing to determine the beginning of the transition to plasticity and the direction of its further spread relative to the plane of isotropy inclined transtrome layered array structure. As a result of the multivariate calculations, for the first time established some regularities of formation of plastic zones around the excavation raspravleny depending on the depth of installation, which are vulnerable to brittle fracture.

Keywords: anisotropy, output, voltage, depth, array.

Сейнасинова Асима Асылбеккызы

*К.физ.–мат.н., ассоциированный профессор,
Академия гражданской авиации, Казахстан*

Рысбаева Гульшат Полатовна

*К.физ.–мат.н., ассоциированный
профессор, Академия пограничной службы
комитета национальной безопасности,*

Республики Казахстан

Авдарсолкызы Сайлаугул

Ст.преподаватель, Казахский

*государственный женский педагогический
университет, каф. информатики*

и прикладной математики, Казахстан

Баймахан Рысбек Баймаханулы

Д.т.н., профессор, Казахский

*государственный женский педагогический
университет, каф. информатики*

и прикладной математики, Казахстан

Аннотация

В данной статье рассматриваются вопросы исследования закономерности образования локально раздробленных пластических зон вокруг горной выработки различного глубокого заложения в рудном пласте, которая сама находится в свою очередь в горном массиве наклонно слоистого анизотропного строения. В работе предложен обобщенный критерий пластического разрушения Кулона–Мора, позволяющий определить начало перехода к пластичности и направление его дальнейшего распространения относительно плоскости изотропии наклонно слоистого массива транстропного строения. В результате проведения многовариантных расчетов, впервые устанавливаются некоторые закономерности образования зон пластических раздроблений вокруг выработки в зависимости от глубины заложения, которые уязвимы при хрупком разрушении.

Ключевые слова:

Анизотропия, выработка, напряжение, глубина, массив.

1. Введение

Сколько бы не совершенствовались СНиП, разработки специальных инструкций и рекомендаций, ежегодно на шахтах и рудниках под землей погибают сотни шахтеров во время взрывов метанов, горных ударов и различного рода разрушений. В научном плане решения таких проблем все еще находятся далеко от практики. Доказательством этому служат непрерывно продолжающиеся гибели людей, работающих в подземных сооружениях различного назначения. Например, только в одном Казахстане в Карагандинских шахтах Казахстана погибли в 2006 году – 43 и в 2008 году 32 шахтера. Число жертв взры-

ва на шахте в Китае 30 ноября 2005г. достигло 161 человека. В результате взрыва на Шахте в Шаньси 9 декабря 2007 г. погибло 105 шахтеров, а 22-февраля 2009г погибли еще 74 человека.

В 2008г. из-за трех взрывов только на одной шахте им.Засядько погибло 106 человек, еще 156 шахтеров было ранено. Всего в Украине за 5 месяцев 2008г. погибло 200 горняков.

Аналогичные данные можно приводить бесконечное множество. Эти и другие факты, только за последние годы, показывают степень недостаточности предпринима-

емых практических мер по предотвращению человеческих жертв, трагических событий, в том числе и в научном плане необходимо развить новые методы решения таких проблем с целью выявления новых закономерностей образования концентрации напряжений вокруг контура подземных сооружений приводящие к разрушению массива вблизи контура и в самих элементах конструкций обделок с учетом наиболее реальных строений горных пород как анизотропия.

2. Задача исследования

Разработать численный алгоритм для определения напряженно-деформированного состояния горного массива горизонтального и наклонно-слоистого анизотропного строения вокруг незакрепленной и закрепленной упругой крепью горной выработки с разработкой критерия, позволяющего определить начало трещинообразования основанной на предельном переходе к пластичности. Разработка нового критерия пластичности позволяющего определить момент перехода зоны массива вокруг выработки от упругости к пластичности и направление ее дальнейшего развития относительно плоскости изотропии массива. С помощью этих разработок исследовать НДС массива вместе с выработкой и установить закономерности образования зоны пластического раздробления массива вокруг выработки в зависимости от глубины ее заложения от свободной земной поверхности на геостатическую нагрузку.

3. Модель и метод исследования

Для определения НДС и локальных критических зон массива вблизи выработки применяем модель наклонно-слоистого массива горных пород Ж.С. Ерманова, Ш.М. Айталиева, Ж.К. Масанова [1].

По этой работе запишем закона Гука для такой среды в компонентах напряжений σ_x , σ_z , τ_{xz} , относительно компонент деформации ε_x , ε_z , γ_{xz} , при переходе от трехмерного случая к плоской задаче для горизонтальной слоистости:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= c_{11}\varepsilon_x + c_{13}\varepsilon_z + c_{15}\gamma_{xz} \\ \sigma_z &= A_{31}\varepsilon_x + A_{33}\varepsilon_z + A_{35}\gamma_{xz} \\ \tau_{xz} &= A_{51}\varepsilon_x + A_{53}\varepsilon_z + A_{55}\gamma_{xz} \end{aligned} \quad (1)$$

который содержит 5 независимых коэффициентов:

$$\begin{aligned} n &= E_1 / E_2 , \\ c_0 &= (1 + \nu_1)(n(1 - \nu_1) - 2\nu_2^2) , \\ c_{11} &= (E_1(n - \nu_2^2)) / c_0 , \\ c_{13} &= A_{31} = (E_1(\nu_2^2 + n\nu_1)) / c_0 , \\ c_{15} &= A_{51} = (\nu_2 E_1) / (n(1 - \nu_1) - 2\nu_2^2) , \end{aligned} \quad (2)$$

Закон Гука для грунтов наклонно слоистого строения:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= d_{11}\varepsilon_x + d_{12}\varepsilon_z + d_{13}\gamma_{xz} , \\ \sigma_z &= d_{21}\varepsilon_x + d_{22}\varepsilon_z + d_{23}\gamma_{xz} , \\ \tau_{xz} &= A_{31}\varepsilon_x + d_{32}\varepsilon_z + d_{33}\gamma_{xz} \end{aligned} \quad (3)$$

где коэффициенты упругости d_{ij} вычисляются выражениями

$$\begin{aligned} d_{11} &= c_{11}c_3 + 2(c_{13} + 2c_{55})c_6 + c_{33}c_4 , \\ d_{12} &= c_{13} + (c_{11} + c_{33} - 2c_{13} - 4c_{55})c_6 , \\ d_{13} &= [(c_{11} - c_{13})c_1 + (c_{13} - c_{33})c_2 - 2c_{55}c_6]c_5 , \\ d_{22} &= c_{11}c_4 + (2c_{13} + 4c_{55})c_6 + c_{33}c_3 , \\ d_{23} &= [(c_{11} - c_{13})c_2 + (c_{13} - c_{33})c_6 + 2c_{55}c_6]c_5 , \\ d_{33} &= c_{55} + [c_{11} + c_{33} - 2c_{13} - 4c_{55}] . \end{aligned} \quad (4)$$

В этих выражениях через c_1, c_2, \dots, c_6 , – обозначены синусы и косинусы углов.

$$\begin{aligned} c_1 &= \cos^2 \phi , \\ c_2 &= \sin^2 \phi , \\ c_3 &= \cos^4 \phi , \\ c_4 &= \sin^4 \phi , \\ c_5 &= \sin \phi \cos \phi , \\ c_6 &= \sin^2 \phi \cos^2 \phi , \\ c_0 &= (1 + \nu_1)(n(1 - \nu_1) - 2\nu_2^2) , \\ c_{11} &= c_{22} = (E_1(n - \nu_2^2)) / c_0 , \\ c_{13} &= (\nu_2 E_1) / (n(1 - \nu_1) - 2\nu_2^2) , \\ c_{33} &= ((1 - \nu_1)E_1) / (n(1 - \nu_1) - 2\nu_2^2) , \\ c_{55} &= G_2 . \end{aligned} \quad (5)$$

Далее приведем краткий алгоритм решения задачи конечноэлементного моделирования.

Для областей рис. 2 составляем систему уравнений равновесия МКЭ в соответствии с методиками работ [2], [3] в виде

$$[R] \cdot \{U\} = \{P\} \quad (6)$$

где $[R]$ – матрица жесткости системы; $\{U\}$ – вектор перемещений; $\{P\}^{leo}$ – вектор геостатической силы, которые действуют в полуплоскости от собственных весов вышележащих слоев горных пород. Для нахождения вектора неизвестных перемещений система уравнений (6) решается методом Гаусса-Зейделя. По найденному вектору $\{U\}$ компоненты деформаций и напряжений последовательно вычисляются с помощью следующих матричных соотношений [4].

$$\{\varepsilon\} = [B]\{U\} \quad (7)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (8)$$

где $\{\varepsilon\}$ и $\{\sigma\}$ – вектора компонент деформации и напряжений и $[D]$ – матрица упругих характеристик, состоящая из упругих постоянных для массивов изотропного и анизотропного строения, которые вычисляются выражениями (2), (4) и (5)

4. Разработка МКЭ
схемы расчетной области

На рис. 1 показаны некоторые примеры наклонно слоистого строения горных пород в реальности. Рис. 2 содержит расчетную схему, разработанную для исследования НДС горной выработки заложенной в рудном пласте горизонтально слоистого строения, который имеет ограниченный размер по высоте и в свою очередь находится в наклоннослоистом горном массиве. Такие сложные структуры в природе образуются тектоническими сжатиями в геологическом времени.

Геометрические размеры исследуемой области: мощность пласта рудного тела - $h_0=20$ м, толщина вышележащей горной породы до земной поверхности - h_1 переменная, глубина заложения выработки - $H=h_1+0,5h_0$. Длина конечноэлементной расчетной области $L=200$ м,

Глубина заложения варьируется от первых 3 м до 1000 м. Граничные условия задачи поставлены в напряжениях и перемещениях (смешанное граничное условие). Угол наклона плоскости изотропии φ_1 меняются от 0 до 90^0 . Для данного варианта исследования угол наклона плоскости изотропии для рудного пласта взята $\varphi_2=0$.

Показанная на рис. 2 область разбита на 5832 восьмиузловые изопараметрические элементы с общим количеством узлов 17892, количество уравнений с вычетом закрепленных степеней свободы составляло 35329.

В качестве материала крепи принят бетон со следующими физико-механическими свойствами. Модуль Юнга - $E=2.32$ Мпа коэффициент Пуассона - $\nu=0.22$, Объемный вес - $\gamma=2.7$ т./м³.

Полные для проведения расчетов данные о свойствах среды приведены в табл. 1 по работе [5].

5. Разработка критерия разрушения
для массива трансстропного строения

Из экспериментальных данных снимаются критические значения максимальных $\sigma_{1,} = \sigma_{\max,} = \sigma_{1c}$ и минимальных $\sigma_{3,} = \sigma_{\min,} = \sigma_{3c}$ и по ним раздельно строим паспорта прочности для горных пород трансверсально-изотропно-го (трансстропного) строения кругами Мора.

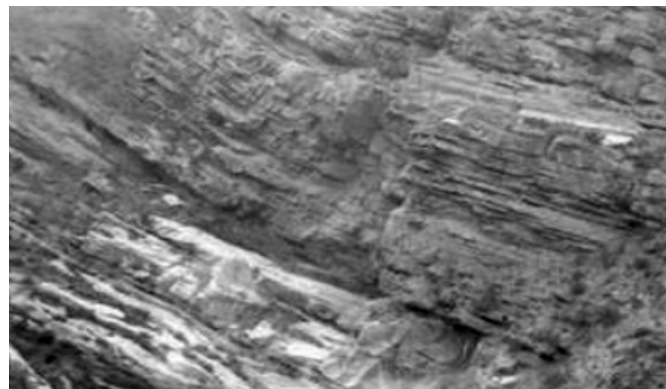


Рисунок 1. Наклонно слоистые строения горных пород.

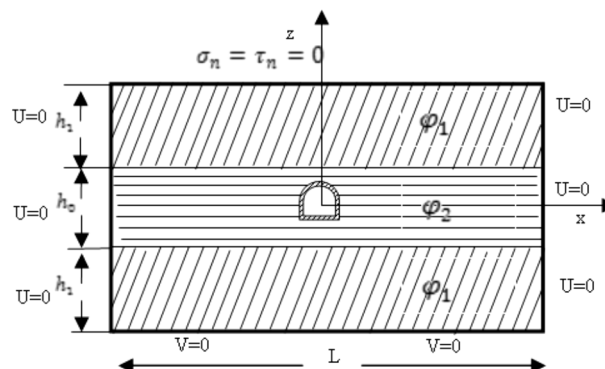


Рисунок 2. Расчетная схема задачи по определению НДС горной выработки и окружающей породы.

Значения $\sigma_1 = \sigma_{1c}$ наносится на положительное направление оси напряжений, а минимальное напряжение наносится на отрицательное направление со знаком минус: $-\sigma_3 = \sigma_{3c}$.

На полученные круги проводим касательные. Точки пересечения по оси τ , нам дадут значения сил сцепления вдоль слоев $C_{||}$ и перпендикулярно слоям C_{\perp} . Также измеряем углы внутренних трений вдоль слоев $\varphi_{||}$ и перпендикулярно слоям φ_{\perp} .

Таблица 1.

Физико-механические свойства горных пород.

Порода	Модуль упругости $E \cdot 10^4 \text{ МПа}$		Коэффициент Пуассона ν		Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}, \text{ МПа}$		Предел прочности при растяжении $\sigma_{раст}, \text{ МПа}$		Объемный вес γ	Коэффициент сцепления		Угол внутреннего трения	
	E_{\parallel}	E_{\perp}	ν_{\parallel}	ν_{\perp}	$\sigma_{\text{сж}\parallel}$	$\sigma_{\text{сж}\perp}$	$\sigma_{\text{раст}\parallel}$	$\sigma_{\text{раст}\perp}$		C_{\parallel}	C_{\perp}	ϕ_{\parallel}	ϕ_{\perp}
Угольный пласт	0,54	0,32	0,34	0,36	16	12	5	5	2,3	45	0,4	31°	29°
Алеволит	3,2	1,6	0,32	0,38	9	8	10	6	2,58	47	0,25	172°	7°

Теперь на подобие подхода В. Витке [5] мы можем записать новое обобщенное условие разрушения (пластичности) Кулона–Мора для транслопного массива в следующем виде

$$\tau_{\perp C} = \sigma_{\perp C} \text{tg} \phi_{\perp} + C_{\perp} \quad (9)$$

$$\tau_{\parallel C} = \sigma_{\parallel C} \text{tg} \phi_{\parallel} + C_{\parallel} \quad (10)$$

6. Оценка точности МКЭ схемы

Точность решения поставленной задачи по МКЭ определяется выполнением физических условий, под которым понимается условие выполнения равенства $\sigma_0 = \gamma H$ в массиве за пределами области концентрации напряжений σ_z , вычисленный МКЭ. Где σ_0 – геостатическое поле напряжений в нетронутым массиве; H – глубина заложения выработки; γ – объемный вес горной породы. Согласно этому критерию для нашей задачи получена следующая оценка точности конечноэлементной расчетной схемы.

На глубине $H = -176,85 \text{ м}$ напряжение $\sigma_z = -176,84$, поскольку $\gamma = 1 \text{ Т/м}^3$, то $\gamma H = -176,85$. Разница составляет 0,01 МПа, что говорит практически о высокой точности разработанной расчетной схемы. Далее решена тестовая задача о транспортном тоннеле, заложенном на глубине 3м [2] по нахождению эпюр окружных нормальных тангенциальных напряжений в весомом массиве, которая была решена с применением треугольного элемента. На рисунке 3 показано решение этой же задачи теперь с применением восьмиузлового изопараметрического элемента.

Поскольку мы в данной работе рассматриваем выработку глубокого заложения, получены значения окружных напряжений и для глубины 300м. Эпюры этих напряжений на рис. 3 показаны линиями 1 и 2.

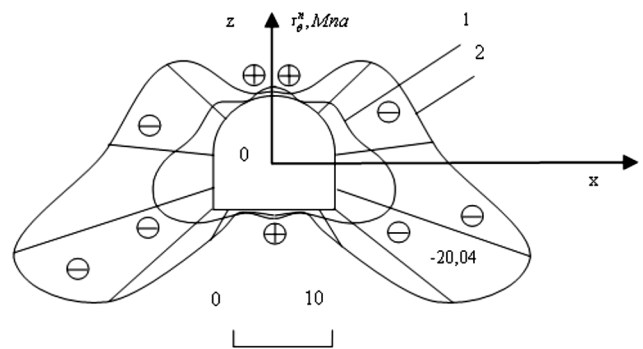


Рисунок 3. Эпюры нормальных тангенциальных сжимающих напряжений на контуре тоннельной выработки в весомом массиве. Линии соответствуют глубинам заложения: 1 - 3м.; 2- 300м.

7. Некоторые результаты исследования

Для полного раскрытия величину давления на границах разнородных слоев и на контур выработки вычисляем найденных с помощью МКЭ компонентов напряжений $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$, в нормальных для любой поверхности координатах с известными формулами теории упругости [6]:

$$\begin{aligned} \sigma_{n,\alpha} &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \sigma_{t,\alpha} &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha, \\ \tau_{nt,\alpha} &= -\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha. \end{aligned} \quad (11)$$

где α угол между нормалью n и горизонтальной осью прямоугольной декартовой системы координат.

С помощью разработанных алгоритмов описанные выражениями (1)–(11) проведены многовариантные расчеты по определению НДС массива и обделок выработки.

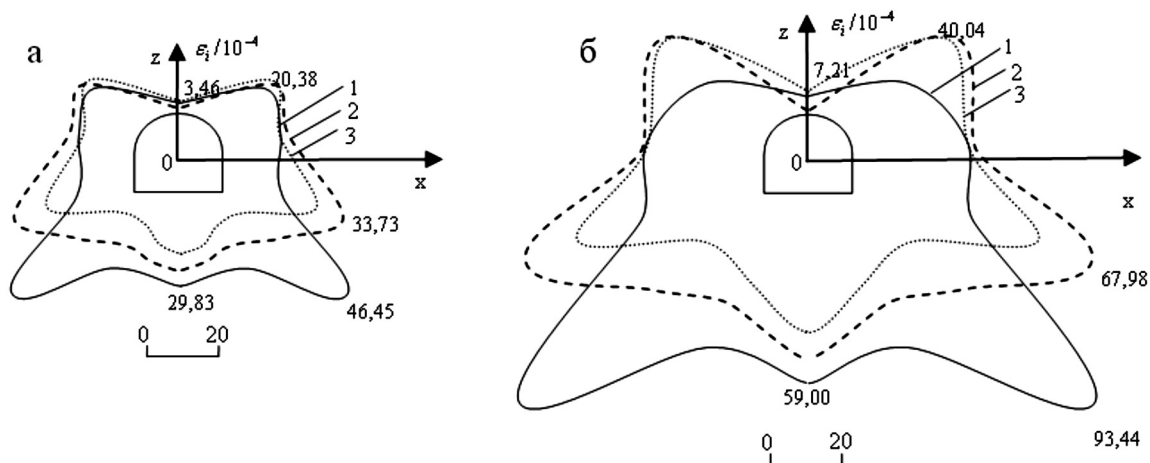


Рисунок 4. Эпюры интенсивности деформации ϵ_i от геостатической нагрузки вдали от контура незакрепленной выработки при глубинах заложения: а - $h=500\text{ м}$; б - $h=900\text{ м}$.

Линии соответствуют различным расстояниям r от центра контура: 1 - $r=2,50\text{ м}$ (контур); 2 - $r=2,56\text{ м}$; 3 - $r=2,62\text{ м}$.

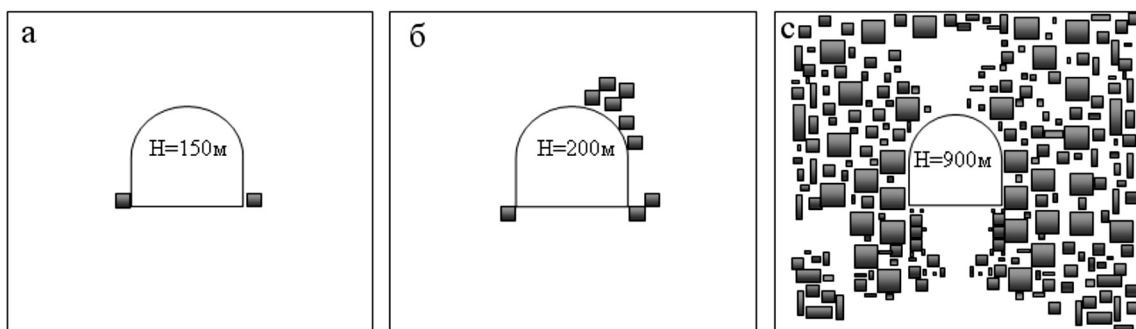


Рисунок 5. Пластические зоны вокруг незакрепленной выработки на различных глубинах заложения H , от геостатической нагрузки при $\varphi_1=0$, $\varphi_2=0$: а- 150м; б- 200м; с- 900м.

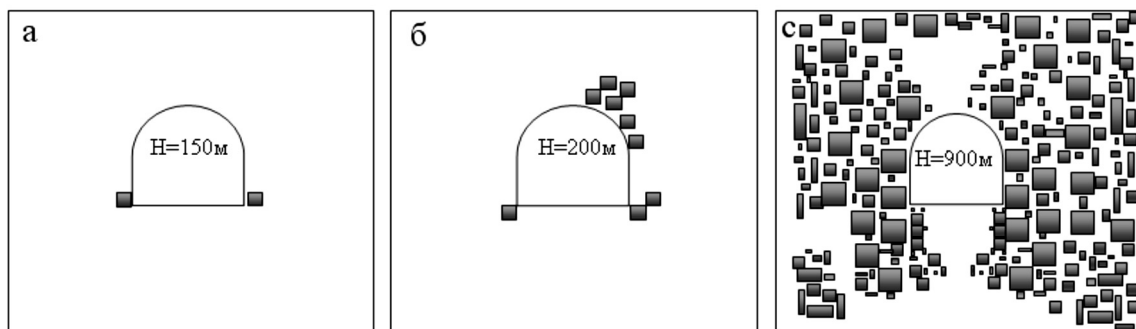


Рисунок 6. Пластические зоны вокруг незакрепленной выработки на различных глубинах заложения H , от геостатической нагрузки при $\varphi_1=30$, $\varphi_2=0$: а- 150м; б- 200м; с- 900м.

На рис. 4 показаны эпюры интенсивности деформации ϵ_i от различных расстояниях от контура незакрепленной выработки для случая $\varphi_1=0$.

Сравнивая вычисленных значений напряжений $\{\sigma_n\}$ по (11) с их критическими значениями таблицы 1, опреде-

лим области разрушений –раздробления массива.

Найденные таким подходом закономерности появления зон пластичности уязвимые раздроблению массива вокруг выработки для различных вариантов угла наклона плоскости изотропии, силовых воздействия и глубин за-

ложения показаны на рис. 5 и 6. Зоны пластических микро разрушений показаны "кирпичиками".

Анализируя пластические зоны, показанные на этих рисунках, заметим, что,

Во-первых, площади пластических зон увеличиваются от контура выработки с ростом глубины заложения от $H=100\text{ м}$ до $H=900\text{ м}$.

Во-вторых, появления пластических зон имеет дискретный характер. Это означает, что некоторые зоны между пластическими остаются в упругом состоянии.

В-третьих, как и в закономерностях концентрации напряжений вокруг контура выработки относительно наибольшее количество пластических зон наблюдается в варианте когда рудные и скальные слои имеют одинаково горизонтально слоистости, т.е. при $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$.

При фиксированном значении $\varphi_2 = 0$ (скальные массивы, расположенные выше и ниже рудного слоя, имеют горизонтально слоистую структуру) с увеличением значения угла наклона плоскости изотропии вокруг выработки от $\varphi_1 = 0$ до $\varphi_2 = 30^\circ$ количества пластических зон незначительно уменьшается. Появления локальных зон пластичности преимущественно с правой стороны объясняется влиянием угла наклона плоскости изотропии. Таким образом, на основе теоретических разработок, проведением многовариантных расчетов, установлены

закономерности образования области пластического раздробления массива вокруг выработки в зависимости от глубины заложения.

8. Заключение

Следует отметить, что переход, определенных зон от упругого к пластическому состоянию, не означает, что именно в этих зонах произойдет разрушение. Такие области горных пород особенно при глубоких заложениях, при переходе к пластичности могут оставаться не разрушенными. Вопрос о разрушении и распространении трещин, и их направлениях необходимо исследовать специально обобщениями методов механики разрушения.

В данной работе с разработкой обобщенного критерия пластического разрушения наклонно слоистого анизотропного массива, которая позволяет определить начало перехода массива к пластическому состоянию и направление его дальнейшего развития относительно плоскости изотропии, проведением многовариантных расчетов по определению НДС массива вокруг горной выработки с применением предложенного критерия, установлены закономерности образования локальных зон пластического раздробления массива в зависимости от глубины ее заложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ержанов Ж.С., Айтиалиев Ш.М., Масанов Ж.К. Устойчивость горизонтальных выработок в наклонно-слоистом массиве. – Алма-Ата:1971:–160 с.
2. Баймахан Р.Б. Расчет сейсмонапряженного состояния подземных сооружений в неоднородной толще методом конечных элементов. Монография (Под ред. академика Ш.М. Айтиалиева. – Алматы, 2002. – С. 232).
3. Баймахан Р.Б., Кожамкулова Ж.Ж. Упругопластическое состояние выработки в неоднородном массиве со специальным условием пластичности. Алматы, 2014. 170с.
4. Рысбаева А.К. Разработка анизотропной модели строения селезащитных грунтовых плотин и обоснование инновационной технологии ее возведения Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Бишкек 2014, 22с
5. Рысбаева Г.П. Баймахан Р.Б. Закономерности трещинообразования в массиве вблизи контура подземного сооружения в анизотропном массиве: Алматы, 2016, – 177 с
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости.– М.:Наука, 1975. – 576 с.

© А.А. Сейнасинова, Г.П. Рысбаева, С. Авдарсолкызы, Р.Б. Баймахан, (asim10@yandex.ru), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»,



"Ни о чем не думает лишь тот,
кто ничего не читает."
Д.Дидро

Реклама