

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.241.54:539.3

Н.В. Черданцев, С.В. Черданцев

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД,
ВМЕЩАЮЩЕГО ВЫРАБОТКУ И ДИЗЬЮНКТИВНОЕ НАРУШЕНИЕ**

Массив осадочных горных пород, вмещающий пластовые месторождения полезных ископаемых, обладает ярко выраженной прочностной анизотропией, обусловленной системами поверхностей ослабления, по которым характеристики прочности массива существенно ниже, чем по другим направлениям. К поверхностям ослабления относятся, главным образом, слоистость и кливаж [1] – [4].

Исследования геомеханического состояния анизотропного по прочности массива, вмещающего как отдельные выработки, так и их системы, проведены в ряде работ [2] – [10]. Эти исследования сводились к построению зон нарушения сплошности (ЗНС) вмещающего массива на основе расчёта полей напряжений и применения критерия Мора – Кузнецова [1] – [4]. Кроме этого, на основе коэффициента нарушенности k_n производились оценки техногенной нарушенности массива, связанной с проведением выработки.

Поверхности ослабления образованы тектоническими процессами, произошедшими в земной коре на ранней стадии формирования массивов горных пород. Кроме слоистости и кливажа под действием этих процессов образуются и другие аномалии в виде дизъюнктивных (разрывных) нарушений с последующими сдвигами блоков массива по линиям разрыва. Механика явления может быть представлена следующим образом. При возникновении нарушения происходит смещение крыльев нарушения по некоторой поверхности, называемой сместителем. Оно сопровождается трением и, как следствие, появлением касательных усилий. Очевидно, что движение прекратится, когда сдвигающие усилия уравновесятся силами трения, возникающими по поверхности этого сместителя [12], [13].

Задача о геомеханическом состоянии вмещающего массива около выработки и близкорасположенного дизъюнктивного нарушения, расчётная схема которой представлена на рис. 1, формулируется следующим образом. В однородном упругом массиве с регулярными поверхностями ослабления вблизи трещины проведена выработка прямоугольного поперечного сечения размерами b , h , L . Начало глобальной системы координат, ось z которой направлена вертикально вверх, совмещена с центром тяжести выработки. Дизъюнктивное

нарушение задаётся двумя параллельными плоскостями, представляющие берега закрытой (сомкнутой) трещины. Такая трещина представляет собой математическую щель, берега которой являются сомкнутыми, а расстояние между ними равно нулю [14]. Следующие параметры характеризуют дизъюнктивную трещину, которую в дальнейшем будем называть щелью. L_n , b_n – размеры в плане, α_n , β_n – углы наклона системы координат x_n , y_n , z_n , расположенной в её центре, координаты которого δ_x , δ_y , δ_z (ось z_n совпадает с нормалью v_n к плоскости щели), ω – угол между направлением простираения щели и направлением сдвига (рис. 1). В ходе решения задачи должно быть определено поле напряжений, построены зоны нарушения сплошности массива и произведена количественная оценка его техногенной нарушенности.

На рис. 1 показано, что массив сверху и снизу нагружен гравитационным давлением γH (γ – средневзвешенный объёмный вес налегающих сверху пород, H – глубина заложения выработки), а по бокам $\lambda \gamma H$ (λ – коэффициент бокового давления). Касательная нагрузка, кроме сил трения, в нетронутом массиве отсутствует. Ориентация же поверхностей ослабления определяется углами падения α_o и простираения β_o . Угол α_o – угол между осью z и нормальной к поверхности ослабления осью z_o , а угол β_o образован осями x и x_o .

В результате деформирования массива происходит проскальзывание берегов щели друг относительно друга и согласно закону сухого трения Кулона по ним возникают силы трения, пропорциональные коэффициенту трения породы по породе и силе давления, действующей нормально плоскости щели.

Таким образом, в массиве горных пород, вмещающем трещину с сомкнутыми берегами в виде математической щели, ещё до ведения горных работ помимо исходного гравитационного поля напряжений существуют и дополнительные касательные напряжения, возникающие в результате взаимного движения её берегов.

Наличие выработки также меняет исходное поле напряжений в массиве горных пород. В результате в нём образуются участки концентрации напряжений, а также участки с пониженными

напряжениями (зоны разгрузки).

Исследования состояния массива путём построения полей напряжений и зон нарушения сплошности в окрестности только горных выработок в отмеченных выше работах проводились в рамках разработанной трёхмерной модели геомеханического состояния анизотропного по прочности массива, в которой основу составляет интегральное уравнение Фредгольма второго рода относительно неизвестного вектора фиктивной нагрузки \mathbf{a} . Применительно к массиву, вмещающему вырез в виде горной выработки, оно представляется следующим образом [3], [4]

$$\frac{1}{2} a_q(Q_O) - \int_O \Phi_{qm}(Q_O, M_O) a_m(M_O) dO_{M_O} = \sigma_{qm}^e \cdot n_m(Q_O) - F(Q_O) \quad (1)$$

В уравнении (1) O – область интегрирования, Q_O, M_O – точки на поверхности этой области, dO_{M_O} – дифференциал поверхности в окрестности точки M_O , $\Phi_{qm}(Q_O, M_O)$ – тензор Грина, определяемый зависимостями [3], [4], [15], $n_q(Q_O), n_q(M_O)$ –

направляющие косинусы вектора нормали к поверхности выработки в точках Q_O, M_O ; $F_q(Q_O)$ – вектор нагрузки, приложенный к поверхности выработки изнутри, который может быть реакцией (отпором) крепи, σ_{qm}^e – компоненты тензора естественного поля в нетронутом горными работами массиве. В отсутствие тектонических напряжений эти компоненты представляются выражениями гравитационного давления

$$\sigma_{11}^e = \lambda\gamma H, \sigma_{22}^e = \lambda\gamma H, \sigma_{12}^e = \sigma_{13}^e = \sigma_{23}^e = 0 \quad (2)$$

Проекции компонентов напряжений естественного поля (2) на поверхности выработки, представляющие первое слагаемое в правой части, выражаются следующим образом [15], [16]

$$\left. \begin{aligned} p_{x,b} &= \sigma_{11}^e \cdot l_b + \sigma_{12}^e \cdot m_b + \sigma_{13}^e \cdot n_b = \sigma_{11}^e \cdot l_b, \\ p_{y,b} &= \sigma_{12}^e \cdot l_b + \sigma_{22}^e \cdot m_b + \sigma_{23}^e \cdot n_b = \sigma_{22}^e \cdot m_b, \\ p_{z,b} &= \sigma_{13}^e \cdot l_b + \sigma_{23}^e \cdot m_b + \sigma_{33}^e \cdot n_b = \sigma_{33}^e \cdot n_b. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В системе выражений (3) $p_{x,b}, p_{y,b}, p_{z,b}$ – составляющие вектора напряжений естественного поля по осям глобальной системы координат, а l_b, m_b, n_b

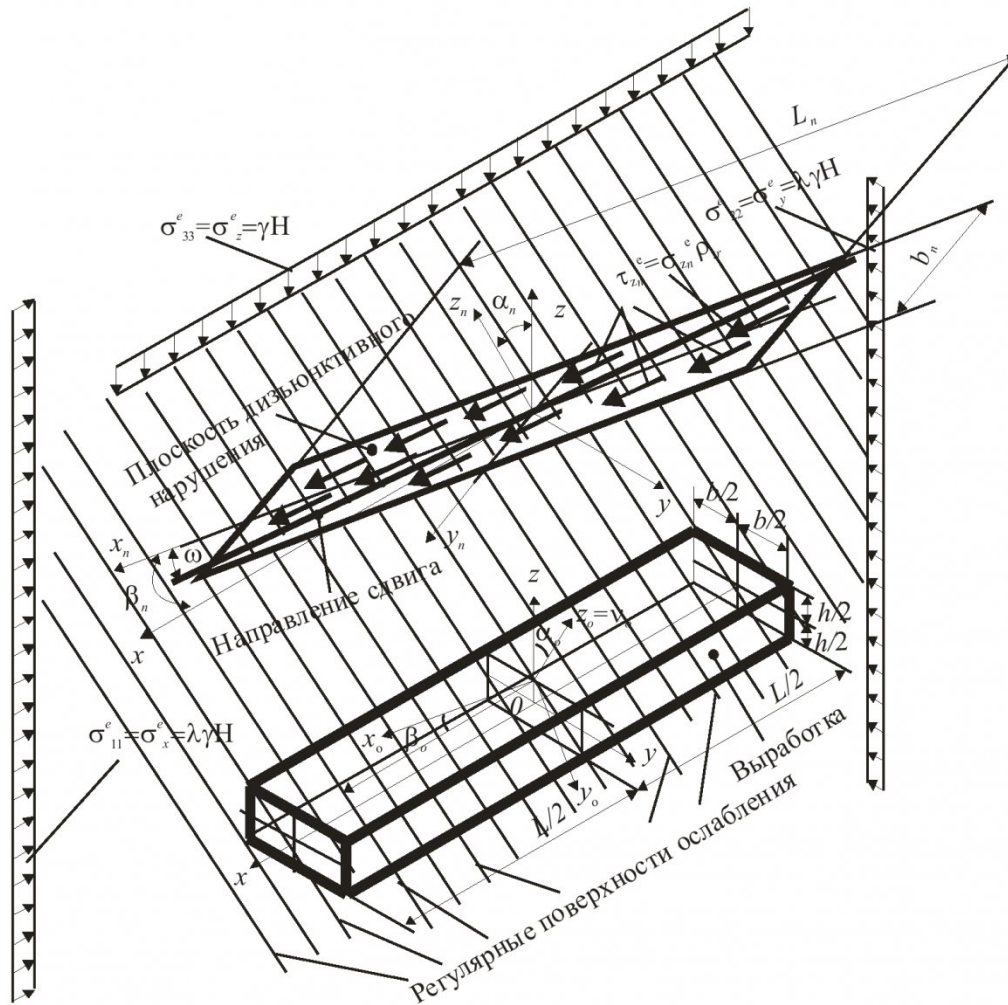


Рис. 1 – Расчётная схема массива с выработкой и целью

– направляющие косинусы нормали к поверхности выработки.

Для массива, вмещающего только щель, интегральное уравнение краевой задачи также может быть представлено интегральным уравнением Фредгольма второго рода

$$\frac{1}{2}a_q(Q_{O_n}) - \int_{O_n} \Phi_{qm}(Q_{O_n}, M_{O_n}) a_m(M_{O_n}) dO_{M_{O_n}} = \sigma_{qm}^e \cdot n_m(Q_{O_n}) \quad (4)$$

Здесь интегрирование ведётся по поверхности щели O_n .

Слагаемое в правой части уравнения (4) является вектором поверхностной нагрузки, приложенной по плоскости щели, и в алгебраической форме он представляется выражениями

$$\begin{aligned} P_{x.n} &= \tau_{x_n z_n} \cdot l_{x_n} + \tau_{y_n z_n} \cdot l_{y_n}, \\ P_{y.n} &= \tau_{x_n z_n} \cdot m_{x_n} + \tau_{y_n z_n} \cdot m_{y_n}, \\ P_{z.n} &= \tau_{x_n z_n} \cdot n_{x_n} + \tau_{y_n z_n} \cdot n_{y_n}, \end{aligned} \quad (5)$$

в которых l_{x_n}, \dots, n_{y_n} – направляющие косинусы осей локальной системы координат. Матрица перехода от исходной системы x, y, z к x_n, y_n, z_n , привязанной к плоскости нарушения и повернутой относительно оси x на угол α_n , а относительно оси z на угол β_n выглядит следующим образом [17]

$$\begin{aligned} \kappa_n &= \begin{pmatrix} l_{x_n} & m_{x_n} & n_{x_n} \\ l_{y_n} & m_{y_n} & n_{y_n} \\ l_{z_n} & m_{z_n} & n_{z_n} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \beta_n & \sin \beta_n & 0 \\ -\cos \alpha_n \cdot \sin \beta_n & \cos \alpha_n \cdot \cos \beta_n & \sin \alpha_n \\ \sin \alpha_n \cdot \sin \beta_n & -\sin \alpha_n \cdot \cos \beta_n & \cos \alpha_n \end{pmatrix} \quad (6) \end{aligned}$$

Касательные напряжения, входящие в (5), связаны с напряжениями естественного поля и коэффициентом трения зависимостями согласно закону сухого трения Кулона следующим образом [13], [14].

$$\begin{aligned} \tau_{x_n z_n} &= -\sigma_{z_n}^e \cdot \rho_{tr} \cdot \cos \omega, \\ \tau_{y_n z_n} &= -\sigma_{z_n}^e \cdot \rho_{tr} \cdot \sin \omega, \end{aligned}$$

где ρ_{tr} – коэффициент трения породы по породе, минус указывает на сдвиг сместителя влево, а нормальное напряжение $\sigma_{z_n}^e$ выражается через компоненты естественного поля напряжений следующим образом

$$\sigma_{z_n}^e = \sigma_{11}^e \cdot l_{z_n}^2 + \sigma_{22}^e \cdot m_{z_n}^2 + \sigma_{13}^e \cdot n_{z_n}^2,$$

где $l_{z_n}, m_{z_n}, n_{z_n}$ – направляющие косинусы

оси z_n , нормальной к сместителю.

Интегральные уравнения (1) и (4), являются сингулярными уравнениями, и их решение может быть построено численно, например, методом механических квадратур. Согласно этому методу сначала поверхность полости разбивается на конечное число элементов N , а интеграл заменяется суммой; фиктивная нагрузка, а также реактивная нагрузка в виде реакции крепи по каждому элементу заменяются равнодействующими силами, при этом считается, что они в пределах элемента постоянны. В результате этой процедуры получаются N уравнений относительно неизвестного вектора фиктивной нагрузки, что в координатной форме соответствует $3N$ уравнениям относительно проекций этого вектора. После решения системы алгебраических уравнений напряжения в произвольной точке k массива определяются путём суммирования напряжений естественного поля и напряжений от действия найденной фиктивной нагрузки [3], [4], [15], [18], [19]

$$\sigma_{q m.k} = \sigma_{q m t.k j} a_{t.j}^* + \sigma_{q m.k}^e.$$

Описанный подход применения интегрального уравнения к определению полей напряжений в научной литературе получил название метода граничных интегральных уравнений, например, в [10]. Различные варианты численного решения интегрального уравнения и вычисления напряжений в расчётных областях называются методом граничных элементов [4], [18], [19].

Для массива, вмещающего и выработку, и математическую щель, очевидно, что описанный выше подход вполне применим. В этом случае интегральное уравнение краевой задачи представляется суммой интегралов по каждой отдельной поверхности. Оно имеет следующий вид

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2}(a_q(Q_{O_b}) + a_q(Q_{O_n})) - \\ &- \left(\int_{O_b} \Phi_{qm}(Q_{O_b}, M_{O_b}) a_m(M_{O_b}) dO_{M_{O_b}} + \int_{O_n} \Phi_{qm}(Q_{O_n}, M_{O_n}) a_m(M_{O_n}) dO_{M_{O_n}} \right) = \\ &= \sigma_{qm.b}^e \cdot n_m(Q_{O_b}) - F(Q_{O_b}) + \sigma_{qm.n}^e \cdot n_m(Q_{O_n}). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь, как и ранее, индекс b относится к выработке, а индекс n – к щели. Остальные обозначения соответствуют обозначениям, принятым в (1).

Первое слагаемое в правой части (7) представляет собой вектор поверхностной нагрузки, действующей по поверхности выработки. В алгебраической форме он представляется системой выражений (3). Третье слагаемое в (7) – вектор поверхностной нагрузки, приложенной по берегам щели, и в алгебраической форме он соответствует выра-

жениям (5).

Таким образом, описанный выше подход к решению задачи о геомеханическом состоянии массива в окрестности выработки и щели является следующим шагом в развитии и модернизации разработанной ранее трёхмерной модели геомеханического состояния анизотропного по прочности массива горных пород [3], [4]. Очевидно, что с

учётом математической щели эта модель существенно расширяет возможности в анализе и оценке состояния массивов осадочных горных пород.

Из представленной трёхмерной модели частным образом вытекает двумерная (плоская) модель, в рамках которой могут быть решены задачи о геомеханическом состоянии массивов, вмещаю-

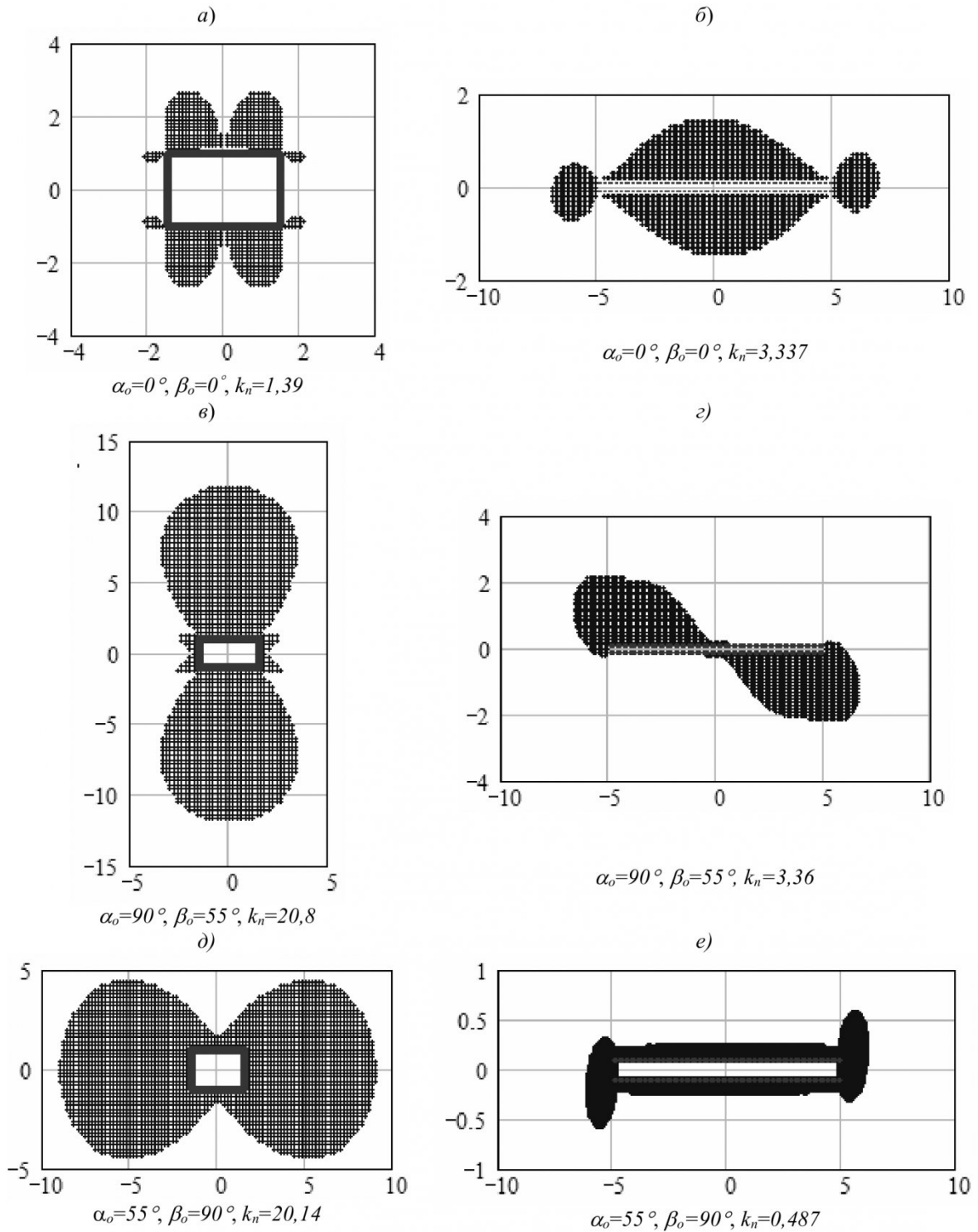


Рис. 2 – Зоны нарушения сплошности в окрестности одиночной выработки (слева) и щели для ряда параметров поверхностей ослабления

щих выработку и щель, размеры которых в одном направлении значительно превышают размеры в двух других. Задача о взаимном влиянии выработки и щели относится к плоской задаче, если трасса выработки и ось простирания щели параллельны, а их размеры в этих направлениях намного превышают размеры в двух других. В перечисленных вариантах горные породы вмещающего массива находятся в условиях плоского деформированного состояния, и для анализа этого состояния допустимо решение плоской задачи механики деформируемого твёрдого тела.

Ниже приведены результаты решения плоской

задачи о состоянии анизотропного массива, вмещающего выработку прямоугольного поперечного сечения и щель. Исходная информация представлена следующими данными: $b=3$ м, $h=2$ м, $b_n=10$ м, $\delta_y=0$, $\omega=90^\circ$, $\rho_r=0,7$, $\gamma=2,5$ т/м³, угол внутреннего трения породы массива $\varphi=20^\circ$, коэффициент сцепления по поверхности ослабления $K=0$, $H=400$ м, $\lambda=1$.

В качестве показателей, по которым производилась оценка состояния массива, приняты зоны нарушения сплошности (ЗНС) – области массива, в которых не выполняется критерий прочности Мора - Кузнецова, и коэффициент нарушенности

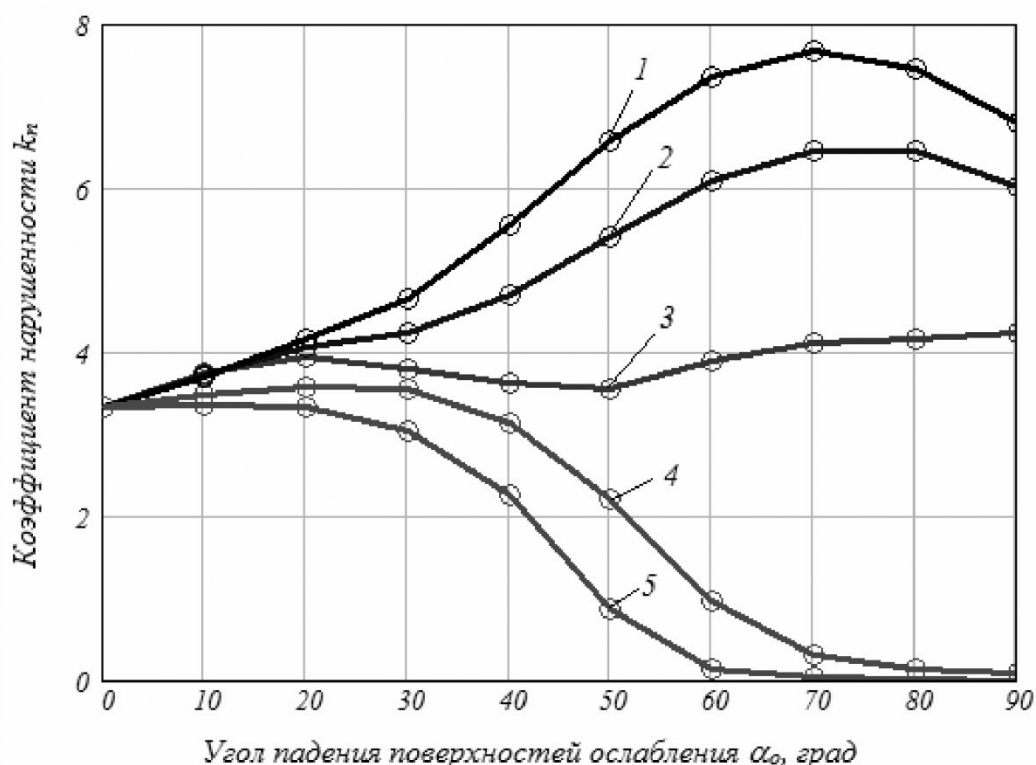


Рис. 3 – Графики зависимости коэффициента нарушенности около одиночной щели от угла падения α_o поверхностей ослабления для ряда значений их угла простирания β_o

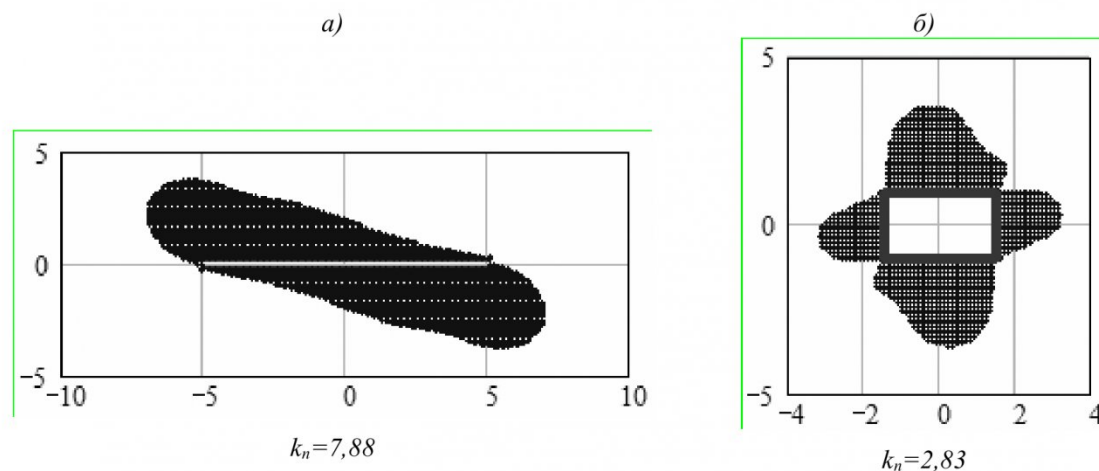


Рис. 4 – Зоны нарушения сплошности в окрестности одиночной щели (а) и одиночной выработки (б), построенные при $\alpha_o = 63^\circ$, $\beta_o = 37^\circ$

k_n , равный отношению площади ЗНС к площади поперечного сечения выработки.

Для сравнения с результатами представленных исследований помещены и результаты иссле-

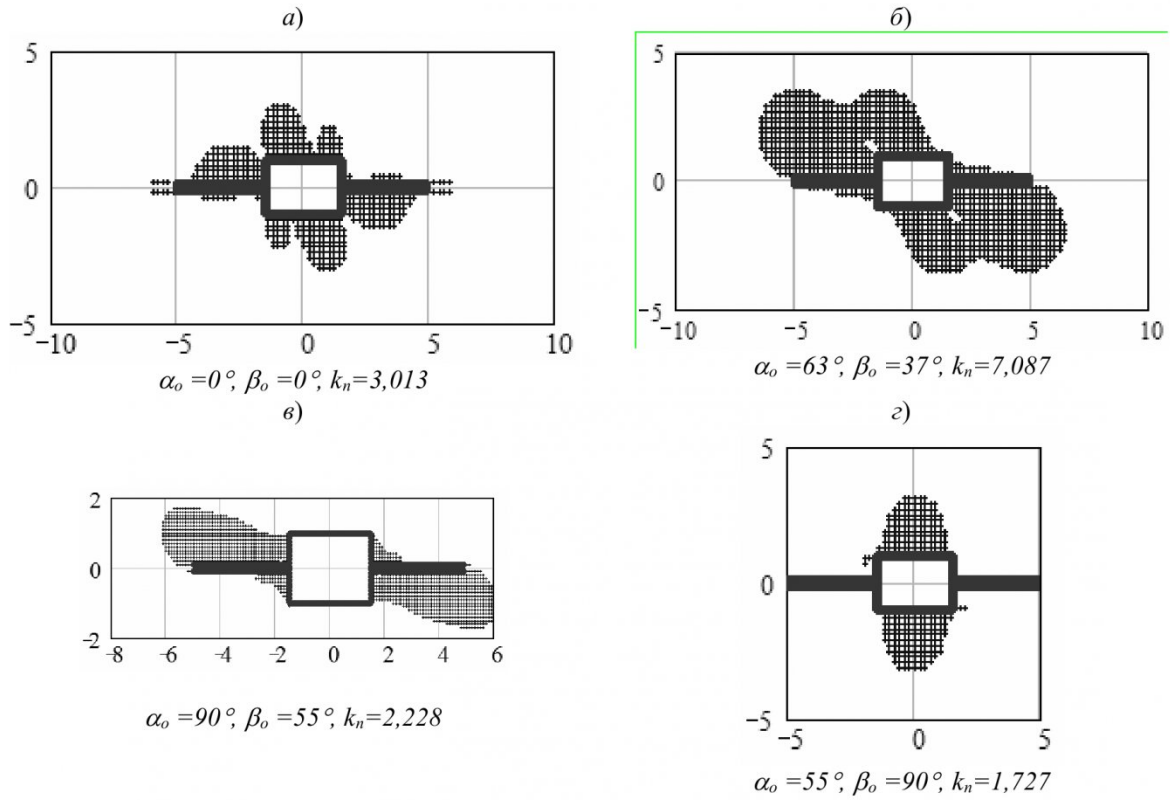


Рис. 5 – Зоны нарушения сплошности в окрестности выработки и пересекающей её горизонтальной щели для ряда параметров поверхностей ослабления

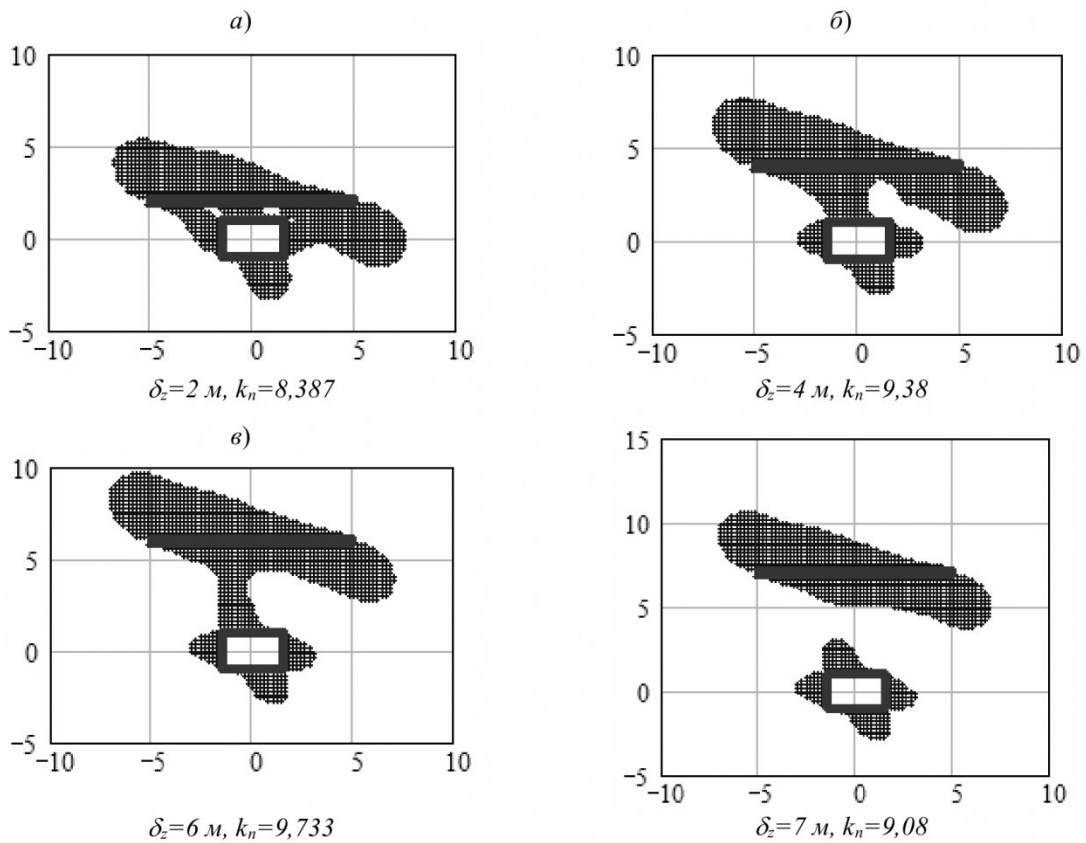


Рис. 6 – ЗНС в окрестности выработки и щели для ряда значений δ_z ($\alpha_o = 63^\circ, \beta_o = 37^\circ$)

дований о состоянии массива с одиночной выработкой. Они получены в рамках модели, разработанной в [3]. Так, например, на рис. 2 представлены ряд фрагментов (а, в, д) с картинками ЗНС в окрестности выработки для некоторых значений углов падения и простирания поверхностей ослабления, взятых из [4]. Из рисунка, в частности следует, что ориентация регулярных поверхностей ослабления существенно влияет на размеры ЗНС массива. При исследовании устойчивости целиков в системе двух выработок прямоугольного сечения установлено, что наибольшие размеры ЗНС соответствуют двум системам поверхностей ослабления [20]. Первая система имеет параметры $\alpha_o=90^\circ$, $\beta_o=55^\circ$, а вторая – $\alpha_o=55^\circ$, $\beta_o=90^\circ$. Фрагменты в, д рисунка показывают, что в окрестности одиночной выработки отмеченные системы поверхностей ослабления также приводят к максимальным зонам нарушения сплошности.

На этом же рисунке (фрагменты б, з, е) при тех же параметрах поверхностей ослабления показаны ЗНС в окрестности одиночной щели. Из рисунка следует, что системы ослаблений, приводящие к наибольшим нарушениям сплошности вокруг выработки, не вызывают таких нарушений вокруг щели. Наоборот, система ослаблений $\alpha_o=55^\circ$, $\beta_o=90^\circ$ даёт минимальные нарушения сплошности в её окрестности.

В этой связи для выявления экстремальных значений нарушений сплошности проведены исследования состояния массива около одиночной щели при изменении углов падения и простирания поверхностей ослабления в диапазоне от нуля до девяноста градусов. Влияние параметров поверхностей ослабления на качественную и количественную оценки нарушенности массива характеризуют графики зависимости коэффициента нарушенности от угла падения поверхностей ослабления для некоторых значений их углов простирания, представленные на рис. 3. Так, график 1 на рисунке соответствует $\beta_o=30^\circ$, график 2 – $\beta_o=20^\circ$, график 3 – $\beta_o=0^\circ$, график 4 – $\beta_o=80^\circ$, график 5 – $\beta_o=90^\circ$.

Из рисунка, в частности, следует, что все графики имеют участки возрастания, убывания и как минимум одну точку перегиба. Почти все графики возрастают на участке $\alpha_o=0^\circ - 20^\circ$, а при увеличении α_o графики, соответствующие $\beta_o=0^\circ$ и $\beta_o \geq 80^\circ$, убывают, причём графики 4 и 5 убывают вплоть до $\alpha_o=90^\circ$, а график 3 убывает лишь до $\alpha_o=50^\circ$, а при дальнейшем увеличении α_o наблюдается его слабый рост. Графики же 1 и 2 возрастают, достигая своих максимумов при $\alpha_o=70^\circ$.

Как показывают детальные расчёты, наибольший эффект нарушенности массива в окрестности одиночной щели достигается при следующих па-

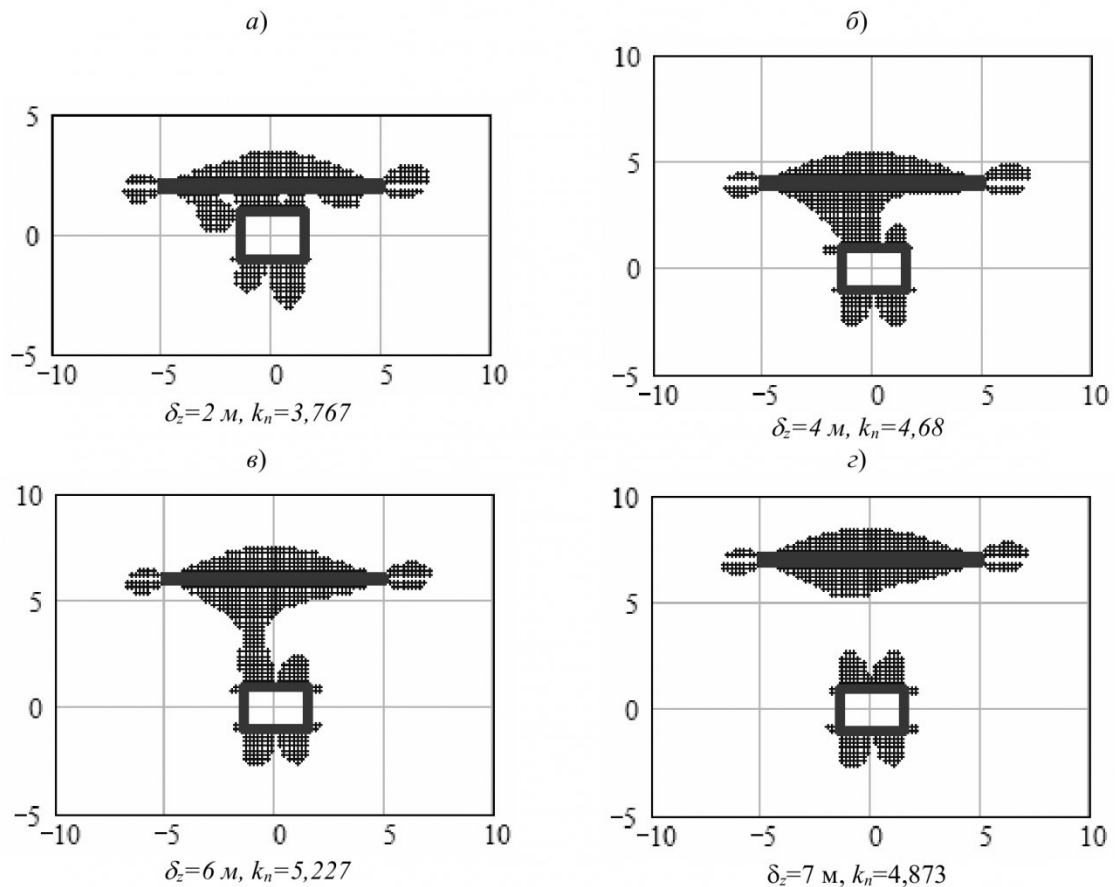


Рис. 7 – ЗНС в окрестности выработки и щели для ряда значений δ_z ($\alpha_o=0^\circ$, $\beta_o=0^\circ$)

раметрах поверхностей ослабления: $\alpha_0=63^\circ$ и $\beta_0=37^\circ$. В этой связи на рис. 4 приведены картины зон нарушения сплошности массива в окрестности одиночной щели и одиночной выработки, построенные при этих параметрах.

Проведены исследования геомеханического состояния массива в условиях взаимного влияния выработки и щели. Вычислительный эксперимент проводился при двух вариантах ориентации поверхностей ослабления и нескольких значениях расстояния между щелью и выработкой. В первом варианте принято $\alpha_0=63^\circ$, $\beta_0=37^\circ$ (наибольшие нарушения сплошности для одиночной щели), второй вариант $\alpha_0=0^\circ$, $\beta_0=0^\circ$ (горизонтальные поверхности ослабления).

Результаты исследований для случаев, когда щель совпадает с горизонтальной осью поперечного сечения выработки ($\delta_z=0$) представлены фрагментами *a*, *b* (рис. 5) в виде картин ЗНС. На этом же рисунке (фрагменты *в*, *г*) показаны зоны нарушения сплошности массива с поверхностями ослабления, при которых около одиночных выработок они максимальны. Хорошо видно, наличие щели гасит эффект нарушенности массива около выработки по сравнению с одиночным её положением.

На рис. 6, 7 представлены фрагменты картин ЗНС, построенных при некоторых взаимных расположениях выработки и щели для двух вариантов ориентации ослаблений. Из рисунков, в част-

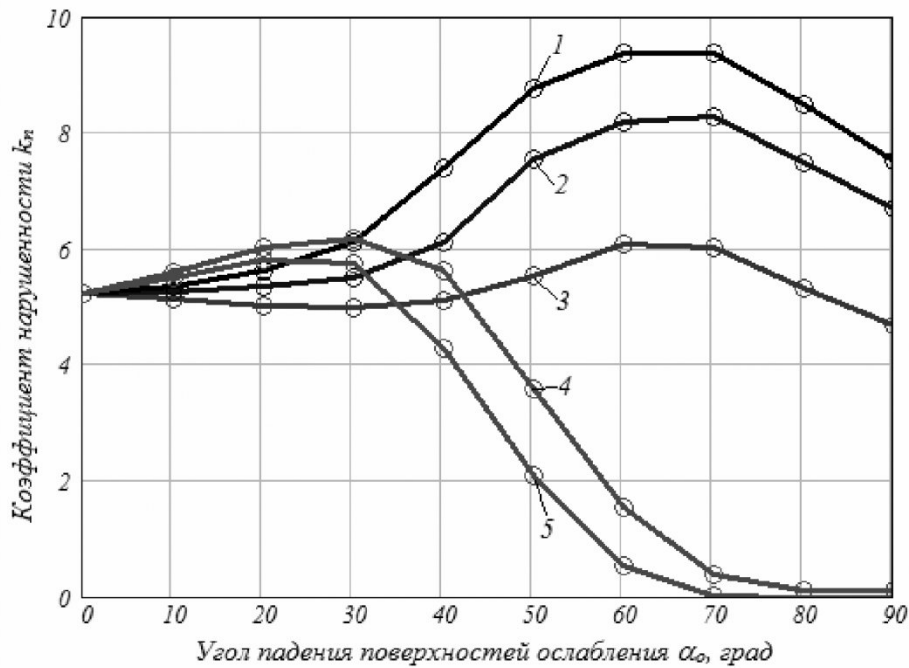


Рис. 8 – Графики зависимости коэффициента нарушения около выработки и щели от угла падения α_0 поверхностей ослабления для ряда значений их угла простирания β_0

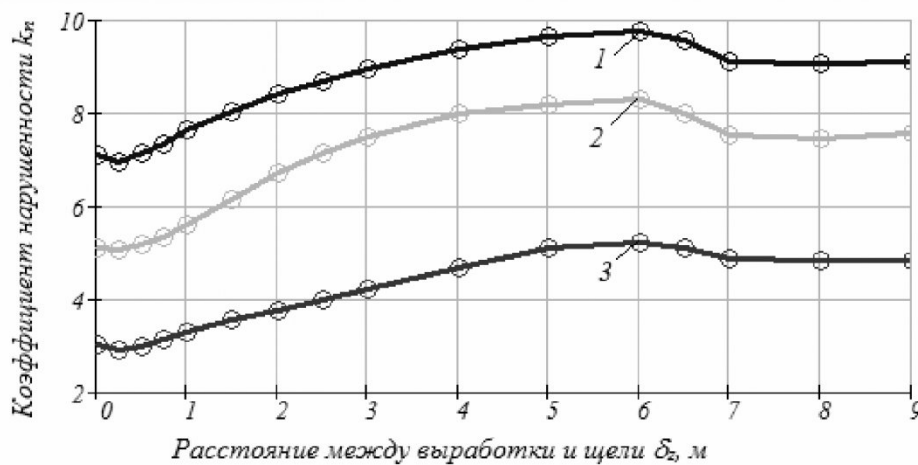


Рис. 9 – Графики зависимости коэффициента нарушения от расстояния между выработкой и щелью для трёх вариантов ориентации поверхностей ослабления

ности следует, что при близком взаимном расположении выработки и щели зоны нарушения сплошности вокруг каждой из них представляют единую зону. Однако, начиная с расстояния $\delta_z > 6$ м, происходит разведение этих зон на отдельные зоны. Отметим, что площадь объединённой зоны не превышает сумму площадей этих зон для каждого отдельного объекта. В этом легко убедиться, если сложить коэффициенты нарушенности, полученные для одиночной выработки и изолированной щели, и сравнить полученную сумму с коэффициентом нарушенности для случая, когда они находятся в области взаимного влияния. Следует отметить, что конфигурация единой ЗНС около выработки и щели отличается от картины, если зоны нарушения сплошности отдельной выработки и щели искусственно состыковать между собой и расположить друг относительно друга таким же образом. Другими словами сумма ЗНС отдельной выработки и щели не совпадает с единой ЗНС выработки и щели при их взаимном влиянии.

Для установления параметров поверхностей ослабления, при которых достигается эффект максимальной нарушенности массива в окрестности выработки и щели проведён вычислительный эксперимент. Здесь его результаты приведены для $\delta_z = 6$ м. На рис. 8 они представлены графиками зависимости коэффициента нарушенности от параметров поверхностей ослабления. Эти графики построены при тех же параметрах среды, что и соответствующие им графики на рис. 3. График 1 соответствует $\beta_o = 30^\circ$, график 2 – $\beta_o = 20^\circ$, график 3 – $\beta_o = 0^\circ$, график 4 – $\beta_o = 80^\circ$, график 5 – $\beta_o = 90^\circ$. Сравнивая графики на рисунках 3 и 8, можно сказать, что качественно отличаются только графики 3. Отметим также и ещё некоторые отличительные моменты. График 3 на рис. 8 убывает на участке изменения α_o от 0° до 30° . На этом участке он принимает наименьшие значения среди всех других графиков, построенных при $\beta_o \neq 0^\circ$. А графики 4 и 5 на рис. 8 также как и на рис. 3, начиная с абсциссы $\alpha_o \geq 30^\circ$ убывают. Они принимают близкие к нулю значения при углах падения ослаблений больших 80° .

Детальные расчёты показывают, что максимум нарушенности вмещающего массива так же, как и в варианте с одиночной щелью, достигается при $\alpha_o = 63^\circ$ и $\beta_o = 37^\circ$.

Сравнивая ЗНС на фрагментах *в*, *д* (рис. 2) с ЗНС на фрагментах *в*, *г* (рис. 5), а также графики на рис. 8, можно сделать следующий вывод. Расположенная рядом с выработкой щель способна исполнять роль экрана. При определённых параметрах поверхностей ослабления она уменьшает нарушенность вмещающего массива.

На рис. 9 представлены графики зависимости коэффициента нарушенности от вертикального расстояния δ_z между центрами тяжестей выработки и щели. График 1 соответствует варианту с

$\alpha_o = 63^\circ$, $\beta_o = 37^\circ$, 2 – $\alpha_o = 60^\circ$, $\beta_o = 20^\circ$, 3 – $\alpha_o = 0^\circ$, $\beta_o = 0^\circ$.

Из рисунка следует, что, во-первых, все графики представляют собой плавные кривые, во-вторых, имеют минимум и максимум. Минимум графиков расположен при $\delta_z = 0,25$ м, а максимум соответствует расстоянию $\delta_z = 6$ м. В этот момент происходит смыкание зон нарушения сплошности при сближении выработки и щели или их размыкание в случаях, если выработка и щель удаляются друг от друга.

В заключение отметим, что представленные в статье результаты исследований получены для однородного массива. Однако, для оценки состояния массива, вмещающего выработку, пройденную по угольному пласту и щель, расположенную непосредственно в пласте или пересекающего его, представленная в статье модель вполне может быть использована для этой цели. Если значения коэффициента Пуассона основного массива и угольного пласта отличаются друг от друга не более, чем на 50%, то, как показано в [21], [22], учёт в модели неоднородной вставки в виде угольного пласта изменит результат не более, чем на 5%.

Выводы.

1. Разработана трёхмерная модель геомеханического состояния анизотропного по прочности массива горных пород, вмещающего выработку и математическую щель типа дизъюнктивного нарушения. Модель расширяет круг решаемых задач в исследованиях геомеханического состояния массивов осадочных горных пород.

2. При определённой комбинации углов падения и простирания поверхностей ослабления зоны нарушения сплошности массива в окрестности одиночной выработки достигают значительных размеров, однако наличие дизъюнктивной трещины может существенно уменьшать эти зоны.

3. По результатам исследований установлено, что наибольшие нарушения сплошности массива поверхностями ослабления происходят в момент смыкания (размыкания) зон нарушения сплошности, образуемых вокруг выработки и трещины.

4. Показано, что наибольшие по размерам зоны нарушения сплошности образуются, если угол падения поверхностей ослабления составляет угол 63 градуса, а угол простирания при этом равен 37 градусам.

5. Характер распределения зон нарушения сплошности около выработки и дизъюнктивного нарушения устанавливает важное обстоятельство: крепить кровлю выработки анкерной крепью следует лишь в тех случаях, когда щель достаточно близко расположено к выработке, либо удалена от неё на достаточно большое расстояние.

6. При расположении дизъюнктивного нарушения в непосредственной близости к суфляру (естественному резервуару скопления метана) возможен значительный приток метана в выра-

ботку, особенно в тех случаях, когда зоны нарушения сплошности вокруг выработки и щели представляют единую область.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов Г.Н. Графические методы оценки предельных состояний трещиноватого массива вокруг горных выработок // Современные проблемы механики горных пород. – Л.: Наука, 1972. С. 30 – 44.
2. Ержанов Ж.С. Комбайновые выработки шахт Кузбасса. Опыт поддержания и расчет устойчивости / Ж.С. Ержанов, В.Ю. Изаков, В.М. Станкус. – Кемерово: Кемеров. книжн. изд-во, 1976. – 216 с.
3. Черданцев Н.В. Некоторые трёхмерные и плоские задачи геомеханики / Н.В. Черданцев, В.Ю. Изаков. – Кемерово: КузГТУ, 2004. – 190 с.
4. Черданцев Н.В. Вопросы методического и инструментального обеспечения мониторинга горных выработок / Н.В. Черданцев, В.Т. Преслер., В.Е. Ануфриев. – Кемерово, ИУ СО РАН, 2012. – 222 с.
5. Черданцев Н.В. Зоны нарушения сплошности в области сопряжения двух выработок квадратного поперечного сечения // Вестник КузГТУ. – 2003. – № 5. – С. 19–21.
6. Черданцев Н.В. Зоны нарушения сплошности вокруг выработок с нетиповыми поперечными сечениями // Вестник КузГТУ. – 2003. – № 6. – С. 8–11.
7. Черданцев Н.В. Устойчивость сопряжения вертикального ствола и горизонтальной выработки // Вестник КузГТУ. – 2004. – № 5. – С. 3–5.
8. Черданцев Н.В. Классификация вырезов по степени их влияния на окружающий массив / Н.В. Черданцев, В.Т. Преслер, В.Ю. Изаков // Вестник КузГТУ. – 2006. – № 5. – С. 3–7.
9. Черданцев Н.В. Оценка нарушенности породного массива в окрестности щелевых вырезов / Н.В. Черданцев, В.Т. Преслер, В.Ю. Изаков // ПМТФ. – 2008. – № 1. – С. 137–139.
10. Черданцев Н.В. Выбор нетипового поперечного сечения выработки в зависимости от физико-механических свойств массива горных пород / Н.В. Черданцев, В.Т. Преслер, В.Ю. Изаков // Горный журнал. – 2009. – № 6. – С. 41–44.
11. Черданцев Н.В. Геомеханическое состояние анизотропного по прочности массива горных пород в окрестности сопрягающихся выработок / Н.В. Черданцев, В.Т. Преслер, В.Ю. Изаков // ФТПРПИ. – 2010. – № 2. – С. 62–68.
12. Букринский, В.А. Геометрия недр. – М.: Недра, 1999. – 526 с.
13. Жданкин Н.А. Анализ напряжённо-деформированного состояния массива горных пород в окрестности движущегося забоя в условиях пространственного взаимодействия горных выработок. Дисс ... д-ра техн. наук. – Кемерово, 1991. – 330 с.
14. Савин Г.Н. Распределение напряжений около отверстий. – Киев: Наукова Думка, 1968. – 888 с.
15. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970.–940 с.
16. Филин А.П. Прикладная механика твёрдого деформируемого тела. Т. 1. – М.: Наука, 1975. – 832 с.
17. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике.– М.: Наука, 1966.– 872 с.
18. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твёрдого тела / С. Крауч, А. Старфилд. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
19. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел.– М.: Мир, 1987. – 525 с.
20. Черданцев Н.В. Устойчивость целиков в окрестности системы выработок прямоугольного сечения, сооружаемых в анизотропном по прочности массиве горных пород / Н.В. Черданцев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2012. – № 2. – С. 110–114.
21. Черданцев Н.В. Моделирование геомеханического состояния анизотропного по прочности неоднородного массива горных пород / Н.В. Черданцев, В.Т. Преслер // Вестник КузГТУ. – 2011. – № 3. – С. 15–22.
22. Черданцев Н.В. Моделирование разрушений в анизотропном по прочности неоднородном массиве горных пород, вмещающем выработку // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. –2012. – № 1. – С. 6–11.

Авторы статьи

Черданцев
Николай Васильевич,
докт. техн. наук, зав. лаб.
геомеханики угольных месторожде-
ний Института угля СО РАН.
E-mail: cherdantsevnnv@icc.kemsc.ru

Черданцев
Сергей Васильевич,
докт. техн. наук,
проф. каф. математики КузГТУ
E-mail: svch01@yandex.ru