

DOI: 10.25558/VOSTNII.2018.7.41.004

УДК 622.023.23

© Н.В. Черданцев, С.В. Черданцев, 2018

### Н.В. ЧЕРДАНЦЕВ

д-р техн. наук,  
главный научный сотрудник  
ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово  
e-mail: nvch2014@yandex.ru



### С.В. ЧЕРДАНЦЕВ

д-р техн. наук,  
главный научный сотрудник  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
e-mail: svch01@yandex.ru



## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА, ВМЕЩАЮЩЕГО ПЛАСТОВУЮ ВЫРАБОТКУ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ НАРУШЕНИЕ, И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ В РАСЧЁТЕ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ

*Приведена модель геомеханического состояния угленосного массива, вмещающего пластовую выработку, пройденную вблизи геологического нарушения. Нарушение представлено узкой щелью, заполненной упругим материалом с заданными характеристиками жёсткости на сжатие и сдвиг. Модель построена на базе основных положений механики деформируемого твёрдого тела и реализована посредством метода граничных элементов. При формулировании граничных условий на контуре выработки используется модификация метода граничных элементов в форме фиктивных нагрузок, а граничные условия на контуре нарушения представляются в форме метода разрывных смещений. Условиями возникновения неупругих деформаций приняты критерии прочности Кулона — Мора и Мора — Кузнецова. Диаграмма условных напряжений пласта представлена диаграммой Прандтля, на которой участок предельного его деформирования горизонтален.*

*Построены эпюры опорного давления в краевой части пласта с учётом и без учёта геологического нарушения, представленного тектоническим нарушением. Показано, что при наличии нарушения, расположенного над выработкой горизонтально, параметры опорного давления выше, чем в его отсутствие. Наличие в кровле выработки тектонического нарушения является причиной возникновения в её породах горизонтальных растягивающих напряжений, которые могут достигать значительных величин.*

Ключевые слова: МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ ПЛАСТА, КОЭФФИЦИЕНТ СЦЕПЛЕНИЯ, УГОЛ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ, ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННАЯ ЗОНА, ТЕОРИЯ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД, ГОРНАЯ ВЫРАБОТКА, ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ НАРУШЕНИЕ.

## Введение

Оценка напряжённо-деформированного состояния массива в окрестности горных выработок, проводимых вблизи геологических (тектонических, дизъюнктивных) нарушений, — важная научная проблема, поскольку нарушение является источником значительных дополнительных напряжений к гравитационному полю напряжённого состояния.

Проблема приобретает особое значение на больших глубинах, когда в краевых зонах пласта предельно напряжённые зоны (зоны неупругих деформаций) в бортах пластовой выработки достигают значительных размеров. В этих случаях детальная и достоверная информация, полученная в рамках разработанных моделей геомеханического состояния, очень важна для прогноза газо- и геодинамических проявлений [1–3].

Как правило, в оценке напряжённого состояния приконтурного массива используются два показателя, которые называют параметрами опорного давления: размер предельно напряжённой зоны  $L_{OT}$  и коэффициент концентрации напряжений  $k_\sigma$  [4–7].

На основе теоретических методов и математических моделей задача определения параметров опорного давления для наиболее широкого спектра изменения характеристик прочности вмещающих пород к настоящему времени не решена, потому что большинство существующих моделей базируются на ряде эмпирических коэффициентов, определение которых связано с постановкой и проведением экспериментов в натуральных условиях.

В связи с этим разработка моделей геомеханического состояния углепородного массива, вмещающего выработки и геологические нарушения, на основе фундаментальных методов механики деформируемого твёрдого тела, наиболее адекватно отражающих поведение реальных массивов, создание алгоритмов и реализация их в пакетах прикладных программ являются важными научными задачами.

Основой разработанной модели о состоянии массива с пластовой выработкой и геологическим нарушением является модель ге-

омеханического состояния анизотропного по прочности массива горных пород с системой выработок, которая детально изложена в [8, 9], а её реализация представлена в ряде работ [10–19].

## Постановка и решение задачи о геомеханическом состоянии углепородного массива около пластовой выработки, пройденной вблизи геологического нарушения

В массиве горных пород с регулярными поверхностями ослабления имеются геологическое нарушение (в дальнейшем — щель) и выработка прямоугольного сечения размерами  $b \times h$ , пройденная на глубине  $H$  по пласту мощностью  $m = h$ , в левом и правом бортах которой образуются предельно напряжённые зоны размером  $L_{OT,1}$ ,  $L_{OT,2}$  (рис. 1).

Массив моделируется невесомой плоскостью, нагруженной гравитационным давлением  $\gamma H$  ( $\gamma$  — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород), а по бокам — давлением  $\lambda \gamma H$  ( $\lambda$  — коэффициент бокового давления).

Геологическое нарушение моделируется щелью шириной  $b_n$ , наклоненной к горизонту под углом  $\alpha_n$  и расположенной таким образом, что расстояния между серединой щели  $O_n$  и началом системы координат  $O_{yz}$ , находящимися в центре тяжести выработки, равны соответственно  $\delta_y$  и  $\delta_z$ .

На рис. 1 цифрой 1 обозначен угольный пласт, цифрой 2 — предельно напряжённые зоны, причём справа от оси  $y$  в предельной зоне показаны характерные участки с линиями скольжения на них.

В процессе решения задачи полагается:

1) трасса выработки и направление щели параллельны, а их размеры вдоль оси  $x$  значительно превосходят размеры в плоскости  $O_{yz}$ , в силу чего можно считать, что породы в окрестности выработки и щели находятся в условиях плоской деформации;

2) прочность пласта значительно ниже прочности вмещающих его пород;

3) сжимающие напряжения положительны, а растягивающие отрицательны.

Таким образом, данная задача учитывает и наличие геологического нарушения, и появление неупругих деформаций в предельно напряжённой краевой зоне угольного пласта.

Особенность задачи о массиве с пластовой выработкой заключается в том, что проч-

ность окружающих горных пород, как правило, существенно выше прочности пласта, по которому пройдена выработка. Поэтому если горные породы деформируются ещё упруго, то краевые части пласта шириной  $L_{от.1} + L_{от.2}$  уже находятся в предельном состоянии.

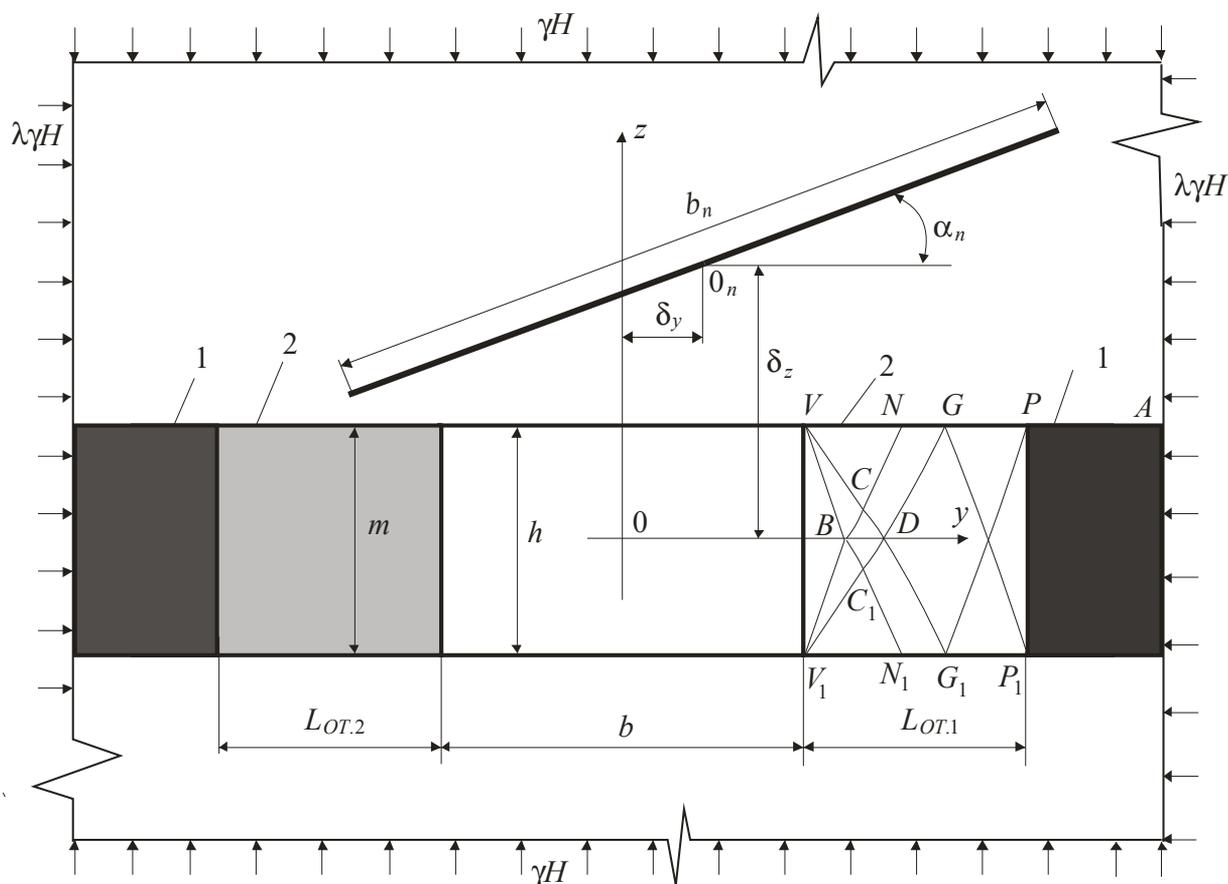


Рис. 1. Расчетная схема задачи о состоянии массива вблизи нарушения

Предельно напряжённые зоны пласта начинают развиваться с его обнажения в бортах выработки при достижении вертикальным главным напряжением  $\sigma_1$  (главное напряжение  $\sigma_3$  на обнажении равно нулю) значения предела прочности пласта на одноосное сжатие  $\sigma_0$ . При увеличении  $\sigma_1$  зона неупругих деформаций распространяется вглубь пласта. Деформация пласта в этой зоне происходит не только по направлению его мощности, но главным образом в плоскости контактов между пластом и окружающими породами, где возникают сцепление и трение. Поскольку вдоль контактов пласта с окружающими породами возможно нарушение сплошности,

проявляющееся в виде его проскальзывания, то в них будут одновременно существовать два предельных состояния равновесия: обыкновенное и специальное [7, 20, 21]. Из обыкновенного условия вытекает критерий прочности в аналитической форме

$$\sigma_1 - \beta_n \sigma_3 = \sigma_0, \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_3$  — главные напряжения,  $\sigma_0$  — предел прочности пласта на одноосное сжатие,  $\beta_n$  — параметр объёмной прочности, определяемый по формуле

$$\beta_n = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi},$$

в которой  $\varphi$  — угол внутреннего трения материала пласта.

Из формулы (1) следует, что левая часть, называемая эквивалентными напряжениями  $\sigma_i$  по теории Кулона — Мора, является постоянной величиной на всех участках предельно напряжённой зоны. Следовательно, диаграмма условных напряжений  $\sigma_i — \epsilon_i$  ( $\epsilon_i$  — эквивалентные деформации) соответствует диаграмме Прандтля. Таким образом, в этой статье разрушение пласта в предельно напряжённой зоне согласно диаграмме Линькова не учитывается.

Отличие в значениях  $\varphi$  и  $\varphi'$  (угол внутреннего трения по контакту пласта и массива) приводит к образованию в зоне неупругих деформаций (предельно напряжённой краевой части пласта) следующих характерных участков, в каждом из которых проявляются отличительные черты состояния пласта [7, 15]. На участках  $VBV_p, VCN, V_1C_1N_1$  (рис. 1) породы деформируются постоянными напряжениями. Сетка линий скольжения на нём представлена двумя семействами прямолинейных изогональных линий. Участки  $VN_1G_1$  и  $V_1NG$  представляют собой криволинейные секторы и являются зонами Прандтля. Первое семейство линий скольжения в зонах Прандтля имеет вид пучка линий, вдоль которых напряжения постоянны, а вторым семейством являются логарифмические спирали. В направлении спиралей напряжения изменяются экспоненциально. На участке  $DGPG_1P_1$  сетка линий скольжения представлена двумя системами криволинейных линий, и она может быть построена лишь приближённо в результате численного решения задачи. На этом участке предельно напряжённой зоны вдоль одного семейства линий скольжения напряжения также постоянны, а вдоль другого их значения могут быть найдены, если предположить, что вертикальные нормальные напряжения вдоль средней линии пласта изменяются экспоненциально [7]:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_0}{2 \sin \varphi} \cdot e^{k \cdot \left( y - \frac{b}{2} \right)} - \frac{\sigma_0}{2} \left( \frac{1}{\sin \varphi} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $k = \frac{2}{m} \cdot \operatorname{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi'$ .

Зависимость (2) установлена на основе многочисленных экспериментальных и теоретических исследований [7] и использовалась в работах [18, 19]. В данных работах показано, что решение задачи о нахождении параметров опорного давления в бортах пластовой выработки сводится к решению упругопластической задачи, которая, в свою очередь, сведена к решению второй внешней задачи теории упругости.

Зная характер распределения линий скольжения и напряжений на них, можно определить напряжения в любой точке предельно напряжённой зоны пласта, в том числе и на границе (контакте) пласта с окружающим массивом. В этой связи замена краевой части пласта, находящейся в предельном состоянии, действующими на контакте пласта с массивом нормальными и касательными напряжениями  $\sigma_{p,y}, \sigma_{p,z}, \tau_{p,yz}, \tau_{p,zy}$  позволяет сформулировать задачу свести к краевой задаче теории упругости. В отличие от классической задачи граничные условия формулируются не по контуру выработки, а по замкнутому контуру, включающему кровлю, почву выработки и контакт пласта с боковыми породами на участке предельной зоны. Так, по горизонтальным участкам этого контура проекции  $p_z, p_y$  полного напряжения соответственно равны напряжениям  $\sigma_z$  и  $\tau_{yz}$ . Тогда в граничном интегральном уравнении краевой задачи теории упругости [22] интегрирование производится по замкнутому контуру, охватывающему кровлю, почву выработки и контур предельно-напряжённой зоны, и это уравнение принимает следующий вид [18, 19]:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} a_q(Q_O) - \int_L \Phi_{qm}(Q_O, M_O) a_m(M_O) dO_{M_O} = \\ & = [\sigma_{e,qm} n_m(Q_O) - f_{kp}(Q_O)] (Q_O \subset L_b) + \\ & + (\sigma_{e,qm} - \sigma_{p,qm}) n_m(Q_O) (Q_O \subset L_p), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $L$  — внешний контур, охватывающий почву, кровлю выработки и границы предельно напряжённой зоны;  $L_p$  — суммарный контур предельно напряжённой зоны;  $L_b$  — контур, охватывающий почву и кровлю выработки, индексы  $q, m$  попеременно принимают значе-

ния 2, 3 (цифра 2 соответствует оси  $y$ , 3 — оси  $z$ );  $Q_O, M_O$  — точки на поверхности этой области;  $dO_{MO}$  — дифференциал поверхности в окрестности точки  $M_O$ ;  $\Phi_{qm}(Q_O, M_O)$  — тензор Грина;  $n_m(Q_O)$  — векторы нормали к поверхности выработки в точках  $Q_O, M_O$ ;  $a_q, a_m$  — компоненты вектора фиктивной нагрузки;  $f_{kp}(Q_O)$  — обобщенный вектор нагрузки, приложенный к поверхности выработки изнутри;  $\sigma_{e.qm}$  — компоненты тензора естественного поля в нетронутом горными работами массиве, которые при отсутствии тектонических напряжений представляются в виде

$$\sigma_{e.y} = \sigma_{e.22} = \lambda\gamma H, \quad \sigma_{e.z} = \sigma_{e.33} = \gamma H, \\ \tau_{e.yz} = \sigma_{e.23} = 0.$$

В основе численного решения интегрального уравнения (3) лежит метод механических квадратур [23, 24]. Для его реализации контур выработки (область  $L_b$ ) разбивается на  $N_b$  элементов (граничных элементов), а контур предельно напряженной зоны (область  $L_p$ ) на  $N_p$  элементов. Далее производится нумерация центров тяжести этих элементов от 1 до  $N(N_b + N_p)$  и замена интеграла в уравнении суммой. Произвольная точка  $Q_O$  контура области обозначается через  $i$ , а точка  $M_O$  — через  $k$ . Тогда уравнение (3) в компонентной форме принимает вид

$$\frac{1}{2} a_{qi} - \sum_{\substack{j=1 \\ k \neq i}}^N \Phi_{qm_{ik}} a_{mk} \Delta L_k = (\sigma_{e.qm_i} n_{qi} - f_{qi})(i=1, N_b) + \\ + (\sigma_{e.qm_i} - \sigma_{p.qm_i}) n_{qi} (i=1, N_p). \quad (4)$$

В уравнении (4)  $\Delta L_k$  — размер  $k$ -го участка контура границы области интегрирования (размер граничного элемента);  $\Delta L_k = \Delta L_{bk}$  при  $k=1, N_b$ ;  $\Delta L_k = \Delta L_{pk}$  при  $k=1, N_p$ .

Интегрирование выражения (4) по каждому элементу при условии, что  $\sigma_{e.qm}$ ,  $\sigma_{p.qm}$ ,  $a_q$  постоянны в пределах каждого из них [19], приводит к векторному уравнению

$$\frac{1}{2} A_{qi} - \sum_{j=1}^N \Phi_{qm_{ik}} A_{mk} \Delta L_i = (t_{e.qm_i} n_{qi} - F_{qi})(i=1, N_b) + \\ + (t_{e.qm_i} - t_{p.qm_i}) n_{qi} (i=1, N_p). \quad (5)$$

Входящие в (5) величины обозначают результирующие усилия, приложенные в центрах граничных элементов:

$$A_{qi} = a_{qi} \Delta L_i, \quad A_{mk} = a_{mk} \Delta L_k, \\ t_{e.qm_i} = \sigma_{e.qm_i} \Delta L_{bi} (i=1, N_b), \\ t_{e.qm_i} = \sigma_{e.qm_i} \Delta L_{pi} (i=1, N_p), \\ F_{qi} = f_{qi} \Delta L_{bi} (i=1, N_b), \quad F_{qi} = f_{qi} \Delta L_{pi} (i=1, N_p).$$

Векторному уравнению (5) в плоской задаче соответствуют два уравнения относительно координат этого вектора. Следовательно, для определения координат вектора фиктивной нагрузки в плоской задаче необходимо решить систему алгебраических уравнений  $2(N_b + N_p) \times 2(N_b + N_p)$ .

После решения системы уравнений напряжения в произвольной точке  $j$  массива определяются суммированием напряжений от действия найденной фиктивной нагрузки и напряжений исходного гравитационного поля напряжений:

$$\sigma_{qm_j} = \sigma_{qmt.jk} A_{tk} + \sigma_{e.qm_j},$$

где  $\sigma_{qmt}$  — компоненты фундаментального тензора третьего ранга, вытекающие из решения задачи Кельвина о действии на бесконечную среду сосредоточенной силы [22, 23, 25].

В разрешающих уравнениях (3), (5) сформулированной задачи кроме неизвестной интенсивности фиктивной нагрузки неизвестным остаётся и суммарный размер предельно напряженной, входящей в область интегрирования  $L$  уравнения (3). Эти неизвестные находятся в ходе реализации итерационной процедуры метода последовательных приближений [18, 19].

В работе [26] поле напряжений в массиве с тектоническим нарушением строится в предположении, что реальный контакт крыльев нарушения представляется узкой прямой трещиной, заполненной упругим материалом. Трещина аппроксимируется системой контактных элементов малой длины, каждый из которых моделируется элементарным разрывом смещений, а поверхности разрыва считаются связанными пружиной, в силу чего деформирование каждого элемента

описывается одномерными соотношениями сжатия и сдвига. Нормальная и касательная жёсткости пружины выбираются так, чтобы отразить свойства заполнителя. Следовательно, компоненты разрыва смещения на элементе могут быть связаны с действующими на нём напряжениями.

Полные напряжения по контактному элементу, а следовательно, и его деформации и смещения состоят из двух частей: начальных и дополнительных. К начальным напряжениям относится исходное поле нетронутого горными работами массива. Как правило, начальные смещения и начальные деформации в таком массиве отсутствуют. Дополнительные напряжения, смещения и деформации возникают на поверхности нарушения в результате ведения горных работ, в частности, сооружения выработки.

В зависимости от наличия или отсутствия в геологическом нарушении начальных деформаций различают два типа нарушений.

К первому типу относятся нарушения с нулевыми начальными деформациями, и поэтому по их контактными элементам отсутствуют и начальные напряжения. Эти элементы испытывают только дополнительные деформации. Такого типа нарушениями являются, например, «перемятые» породные слои с более низкими упругими характеристиками по сравнению с характеристиками остального массива. Напряжения по таким нарушениям, как и в остальном массиве (в отсутствии выработки), равны исходным напряжениям.

Ко второму типу относятся нарушения с ненулевыми начальными деформациями в предположении, что начальное поле напряжений искажено за геологические эпохи влиянием гравитационного поля напряжений. К этому типу нарушения относятся дизъюнктивные нарушения. Поскольку тектоническое нарушение может быть аппроксимировано контактными элементами, то напряжённо-деформированное состояние массива около него может быть рассчитано методом разрывных смещений [26].

Система разрешающих уравнений метода разрывных смещений для дизъюнктивного

нарушения прямолинейной формы в отсутствии выработки представляется в следующем виде:

$$K_s D_{y_i} + \sum_{j=1}^{N_n} \Psi_{ij} D_{y_j} = \frac{(1-\lambda)\gamma H}{2} \cdot \sin 2\alpha_n,$$

$$K_n D_{z_i} + \sum_{j=1}^{N_n} \Psi_{ij} D_{z_j} = \left( \frac{1+\lambda}{2} + \frac{1-\lambda}{2} \cdot \cos 2\alpha_n \right) \gamma H,$$

где  $i, j$  — номера граничных элементов;  $K_s, K_n$  — сдвиговая и нормальная жёсткости заполнителя щели;  $\Psi$  — матрица влияния разрывов смещений на контуре щели;  $D_y$  и  $D_z$  — координаты вектора разрыва смещений на контуре щели;  $\alpha_n$  — угол наклона щели к горизонту.

При наличии в массиве выработки нарушения граничных условий на контуре выработки выражаются через фиктивную нагрузку, а условия на контуре нарушения — через разрывы смещений. Причём в зависимости от того, в каком состоянии находилось нарушение до проведения выработки, различают два варианта условий на её поверхности.

Таким образом, система граничных уравнений на поверхностях близкорасположенных выработки и щели состоит из четырёх блоков. Первый блок включает уравнения метода фиктивных нагрузок, формулирующих условия на контуре выработки. Второй блок ставит граничные условия на поверхности выработки от смещений на поверхности щели. Третий блок формулирует разрывы смещений на поверхности щели от действия фиктивной нагрузки, приложенной на поверхности выработки. Четвёртый блок включает уравнения метода разрывных смещений, формулирующих условия на поверхности щели.

Применительно к массиву с выработкой и дизъюнктивным нарушением система граничных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases}
 \frac{1}{2} A_{y_i} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N_b} (\Phi_{yy_{ik}} A_{y_k} + \Phi_{yz_{ik}} A_{z_k}) \Delta L_{b_i} + \sum_{k=1}^{N_n} (\Omega_{yy_{ik}} D_{y_k} + \Omega_{yz_{ik}} D_{z_k}) \Delta L_{b_k} = \\
 = \lambda \gamma H n_{yb_i} \Delta L_{b_i} + (\lambda \gamma H - \sigma_{py_i}) n_{yp_i} \Delta L_{p_i} - \tau_{pyz} n_{zp_i} \Delta L_{p_i}, \\
 \frac{1}{2} A_{z_i} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{N_b} (\Phi_{zy_{ik}} A_{y_k} + \Phi_{zz_{ik}} A_{z_k}) \Delta L_{b_i} + \sum_{k=1}^{N_n} (\Omega_{zy_{ik}} D_{y_k} + \Omega_{zz_{ik}} D_{z_k}) \Delta L_{b_i} = \\
 = (\gamma H - q) n_{zb_i} \Delta L_{b_i} + (\gamma H - \sigma_{pz_i}) n_{zp_i} \Delta L_{p_i} - \tau_{pyz} n_{yp_i} \Delta L_{p_i}, \\
 \sum_{k=1}^{N_b} (\Gamma_{yy_{ik}} A_{y_k} + \Gamma_{yz_{ik}} A_{z_k}) + \sum_{k=1}^{N_n} (\Psi_{ik} D_{y_k} + \Psi_{ik} D_{z_k}) = \frac{(1-\lambda)\gamma H}{2} \sin 2\alpha_{ni}, \\
 \sum_{k=1}^{N_b} (\Gamma_{zy_{ik}} A_{y_k} + \Gamma_{zz_{ik}} A_{z_k}) + \sum_{k=1}^{N_n} (\Psi_{ik} D_{y_k} + \Psi_{ik} D_{z_k}) = \left( \frac{1+\lambda}{2} + \frac{1-\lambda}{2} \cos 2\alpha_{ni} \right) \gamma H.
 \end{cases} \quad (6)$$

В уравнениях (6)  $i, j$  — номера граничных элементов;  $N_b$  — число граничных элементов на контуре выработки;  $N_p$  — число граничных элементов на контуре предельно напряжённой зоны;  $N_n$  — число граничных элементов на контуре щели;  $A_y, A_z$  — координаты векторов сосредоточенной фиктивной нагрузки в центрах граничных элементов;  $D_y, D_z$  — координаты вектора разрыва смещений на контуре щели;  $\sigma_{py}, \sigma_{pz}, \tau_{pyz}$  — нормальные и касательные напряжения в предельно напряжённой зоне пласта вдоль его контакта с окружающими породами;  $\Delta L_b$  — размер граничного элемента выработки;  $\Delta L_p$  — размер граничного элемента контура предельно напряжённой зоны;  $n_{yb}, n_{zb}$  — направляющие косинусы нормали к точкам контура выработки;  $n_{yp}, n_{zp}$  — направляющие косинусы нормали к точкам контура предельно напряжённой зоны;  $K_s, K_n$  — сдвиговая и нормальная жёсткости заполнителя щели;  $\Phi_{yy}, \Phi_{yz}, \Phi_{zy}, \Phi_{zz}$  — матрицы влияния фиктивной нагрузки на контуре выработки;  $\Gamma_{yy}, \Gamma_{yz}, \Gamma_{zy}, \Gamma_{zz}$  — матрицы влияния фиктивной нагрузки на контуре щели;  $\Gamma_{yy}, \Gamma_{yz}, \Gamma_{zy}, \Gamma_{zz}$  — матрицы влияния разрывов смещений на контуре выработки. Матрицы  $\Phi_{yy} \dots \Gamma_{zz}$  определяются по формулам [22], а матрицы  $\Omega_{yy} \dots \Omega_{zz}, \Psi$  — по формулам [26].

Применительно к нарушению первого типа (не дизъюнктивному нарушению) в третьем и четвертом уравнениях системы (6) правые части должны быть равны нулю.

Таким образом, система уравнений (6) имеет порядок  $2(N_b + N_n) \times (N_b + N_n)$  относительно неизвестных  $A_y, A_z, D_y, D_z$ , отыскав

которые определяем напряжения в произвольной точке  $k$  расчетной области путём суммирования напряжений от действия фиктивной нагрузки, разрывов смещений и напряжений естественного поля по формулам

$$\begin{aligned}
 \sigma_{y,k} &= \sigma_{1_{y.ki}} \cdot A_{y,i} + \sigma_{2_{y.ki}} \cdot A_{z,i} + \\
 &+ \sigma'_{y.ki} \cdot D_{y,i} + \sigma''_{y.ki} \cdot D_{z,i} + \lambda \gamma H, \\
 \sigma_{z,k} &= \sigma_{1_{z.ki}} \cdot A_{y,i} + \sigma_{2_{z.ki}} \cdot A_{z,i} + \\
 &+ \sigma'_{z.ki} \cdot D_{y,i} + \sigma''_{z.ki} \cdot D_{z,i} + \gamma H,
 \end{aligned} \quad (7)$$

в которых величины  $\sigma_{1_y}, \sigma_{1_z}, \tau_{1_{yz}}, \sigma_{2_y}, \sigma_{2_z}, \tau_{2_{yz}}$  — компоненты фундаментального тензора напряжений в задаче Кельвина о единичных силах, действующих в направлении осей  $y, z$  в упругом пространстве [22, 23, 25]. Величины  $\sigma'_y, \sigma'_z, \tau'_{yz}, \sigma''_y, \sigma''_z, \tau''_{yz}$  — компоненты напряжений от действия единичных разрывов смещений в направлениях осей  $y, z$  [26].

### Проведение расчётов и анализ результатов

В качестве исходных данных приняты следующие параметры массива и выработки:  $H = 800$  м,  $\lambda = 1$ ,  $\gamma = 25$  кН/м<sup>3</sup>,  $\varphi = 20^\circ$ ,  $\sigma_0 = 10$  МПа,  $K' = 0$ ,  $\varphi' = 10^\circ$ ,  $b = 5$  м,  $h = 3$  м,  $q = 0.05$  МПа,  $b_n = 50$  м,  $\alpha_n = 0^\circ$ ,  $K_s = 0.4 K_n$ . Значения  $K_n$  в ходе вычислительного эксперимента менялись. Нарушение относится к первому типу (с нулевыми начальными деформациями), расположено в кровле пласта над выработкой горизонтально и симметрично относительно вертикальной оси  $z$ .

Поскольку  $\alpha_n = 0^\circ$  и  $\delta_y = 0$ , то расчётная

схема задачи симметрична относительно вертикальной оси и, следовательно,  $L_{OT1} = L_{OT2} = L_{OT}$ .

На рис. 2, а показаны результаты решения упругопластической задачи о состоянии краевой зоны пласта в отсутствии нарушения. На нём приведены эпюры напряжений вдоль кровли пласта (на рис. 1 линия VA), а точки V, N, G, P соответствуют точкам рис. 1.

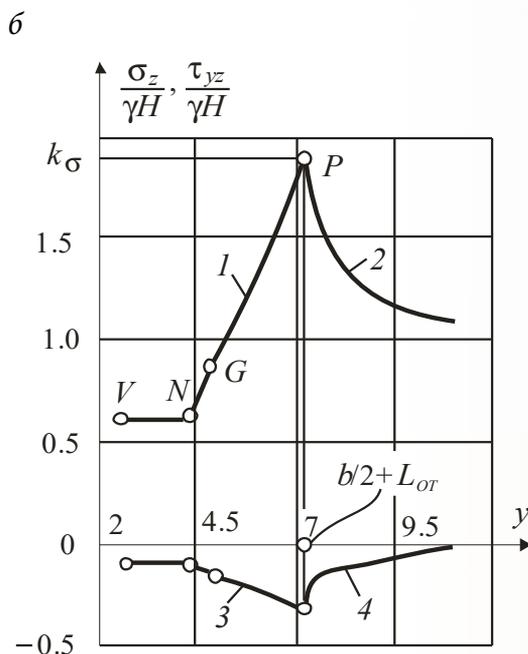
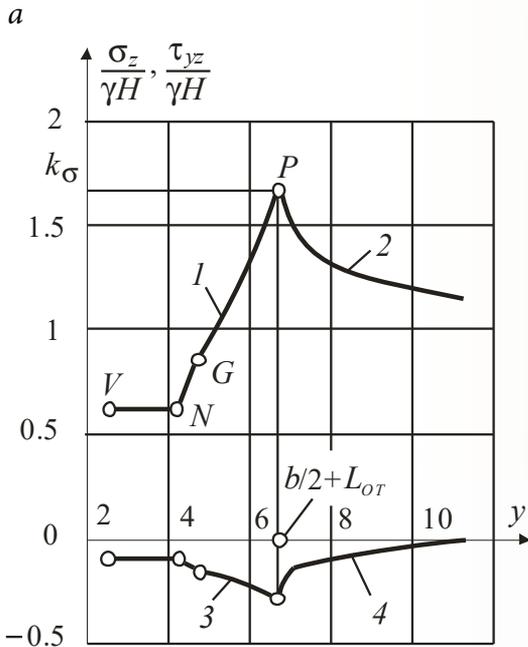


Рис. 2. Эпюры напряжений в предельной зоне и упругой части пласта

Графики 1, 2 — эпюры напряжений  $\sigma_z$  в предельной зоне и упругой части пласта, соответственно, а графики 3, 4 — эпюры напряжений  $\tau_{yz}$ . Из рисунка определена максимальная величина опорного давления, которая составляет  $1.657 \gamma H$ . Отношение этого напряжения к  $\gamma H$  называется коэффициентом концентрации напряжений  $k_\sigma$ . Размер предельно напряжённой зоны  $L_{OT}$  получился равным 4.172 м.

На рис. 2, б эпюры  $\sigma_z, \tau_{yz}$  построены при наличии в массиве нарушения. Оно находится на расстоянии  $\delta_z = \delta = 6,5$  м (рис. 1). Коэффициент жёсткости заполнителя  $K_n = 500$  МПа/м. Из рис. 2, б определён коэффициент концентрации напряжений  $k_\sigma$ , который составляет 1.89 единицы, и вычислен размер предельно напряжённой зоны  $L_{OT} = 4.565$  м.

Из анализа приведённых на рис. 2, а и рис. 2, б результатов следует, что наличие в массиве нарушения, расположенного вблизи выработки, увеличивает параметры опорного давления в краевых частях пласта.

На рис. 3, а построена эпюра горизонтальных нормальных напряжений  $\sigma_y$  в кровле выработки в отсутствии нарушения. Её значение на оси  $z$  (при  $y = 0$ ) равно  $0.36 \gamma H$ .

На рис. 3, б эпюра  $\sigma_y$  построена при наличии нарушения, и её ордината при  $z = 0$  составляет  $-0.096 \gamma H$ . Эпюры на этих рисунках качественно отличаются друг от друга. В отсутствие нарушения напряжения  $\sigma_y$  всюду сжимающие, а при наличии нарушения на большей части кровли выработки они растягивающие, и, следовательно, при определённых горнотехнических и горно-геологических характеристиках среды в породах кровли могут появиться вертикальные трещины, обусловленные этими напряжениями.

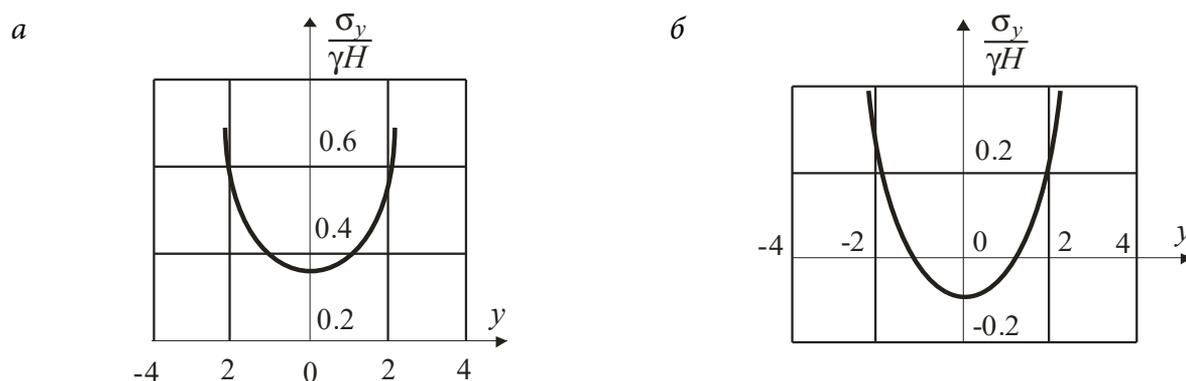


Рис. 3. Эпюры нормальных напряжений  $\sigma_y$  в кровле выработки

В связи с этим проведён анализ влияния на напряжённое состояние массива горизонтального симметричного нарушения для ряда характеристик жёсткости заполнителя и различных расстояний  $\delta$ . Его результаты представлены в виде графиков на рис. 4.

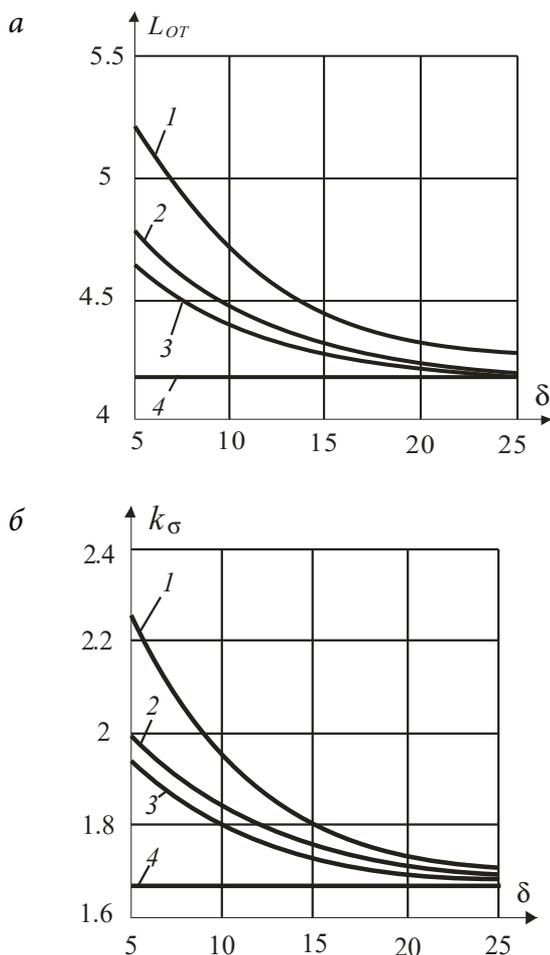


Рис. 4. Графики зависимости предельной зоны (а) и коэффициента концентрации напряжений (б) в зависимости от расстояния до нарушения

На рис. 4, а показана серия графиков зависимости размера предельно напряжённых зон  $L_{OT}$  от расстояния  $\delta$  между осью  $y$  и нарушением, а серия графиков зависимости коэффициента концентрации  $k_\sigma$  от  $\delta$  построена на рис. 4, б. Причём график 1 построен при  $K_n = 100$  МПа/м, график 2 —  $K_n = 200$  МПа/м, график 3 —  $K_n = 500$  МПа/м, линия 4 соответствует напряжению  $\sigma_y$  в кровле выработки в отсутствии нарушения.

Графики представляют собой вид асимптотически убывающих вогнутых кривых. Их асимптоты соответствуют параметрам опорного давления в отсутствии нарушения. Из графиков хорошо видно, что уменьшение коэффициента жёсткости заполнителя и расстояния до нарушения значительно повышает параметры опорного давления по сравнению с одиночной выработкой. На исследуемом диапазоне изменения характеристик нарушения максимальное отклонение размера  $L_{OT}$  составляет 25.1 %, а  $k_\sigma$  — 35.9 %.

На рис. 5 построены графики зависимости минимального горизонтального напряжения  $\sigma_{y.min}$ , действующего в кровле выработки на оси  $z$ , от расстояния между осью выработки и нарушением для ряда значений коэффициента жёсткости заполнителя. График 1 построен при  $K_n = 100$  МПа/м, график 2 —  $K_n = 200$  МПа/м, график 3 —  $K_n = 500$  МПа/м, линия 4 соответствует напряжению  $\sigma_y$  в кровле выработки без нарушения. Эти графики имеют вид асимптотически возрастающих выпуклых кривых. Асимптотой является прямая линия 4, соответствующая параметрам для одиночной выработки.

Из рис. 5 следует, что с уменьшением расстояния  $\delta$  и коэффициента жёсткости увеличиваются растягивающие напряжения в точках кровли выработки, лежащих на оси  $z$ . Эти напряжения достигают таких величин, что даже в очень крепких и монолитных горных породах появляются вертикальные трещины разрыва. К примеру, кривая 1 имеет минимальное значение  $-1.251\gamma H$ , что на заданной глубине 800 м равно растягивающему напряжению 25.02 МПа. Это значение соот-

ветствует пределу прочности на растяжение очень прочных горных пород типа базальта, составляющего мантию Земли. Массивы горных пород земной коры такой прочностью не обладают и, следовательно, данное напряжение непременно приведёт к разрыву кровли пласта над выработкой. Однако по мере увеличения расстояния до нарушения, растягивающие напряжения быстро уменьшаются, и при расстоянии 9.5 м они исчезают на всём диапазоне изменения параметра  $K_n$ .

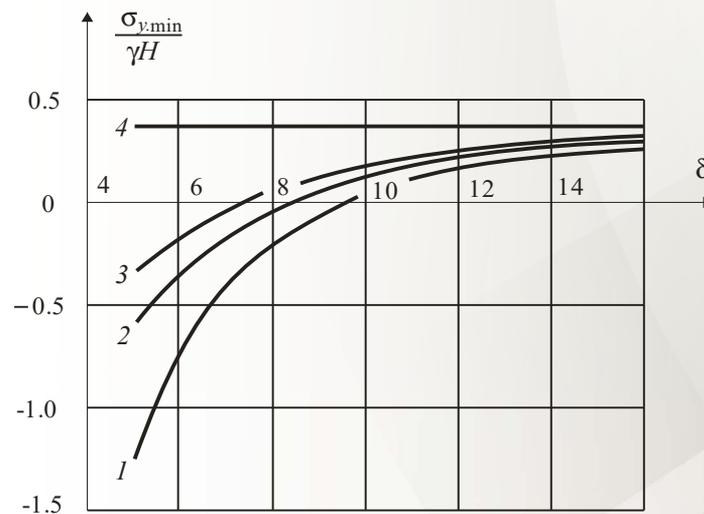


Рис. 5. Графики зависимости минимальных значений горизонтальных напряжений в кровле выработки  $\sigma_{y,min}$  от расстояния до нарушения  $\delta$

## Выводы

1. Разработанная модель геомеханического состояния массива, вмещающего пластовую выработку и геологическое нарушение, обеспечивает оценку напряжённого состояния угольного пласта для всего диапазона возможных вариантов изменения параметров нарушения.

2. Параметры опорного давления при наличии в кровле выработки нарушения возрастают, и тем значительнее, чем ближе оно расположено к выработке и чем меньше характеристики жёсткости его заполнителя. Графики изменения параметров опорного

давления, построенные по результатам проведённого вычислительного эксперимента, являются асимптотически убывающими функциями.

3. Наличие в массиве геологического нарушения вызывает в окружающих выработку породах растягивающие напряжения, которые при определённых значениях коэффициента жёсткости заполнителя и расстояниях между ними способны привести к появлению в кровле выработки вертикальных трещин разрыва и разрушению даже очень прочных и монолитных пород.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
2. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. М.: Недра, 1979. 296 с.
3. Шинкевич М.В., Козырева Е.Н., Плаксин М.С., Родин Р.И. Методические основы прогноза динамики метанообильности выемочного участка при отработке мощных и сближенных пластов длинными столбами // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. № 3. С. 23–29.
4. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. М.: Недра, 1992. 544 с.
5. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.
6. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. М.: Недра, 1989. 488 с.
7. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
8. Черданцев Н.В., Шаламанов В.А. Граничные интегральные уравнения в задачах механики подземных сооружений // Известия вузов. Горный журнал. 2004. № 5. С. 50–54.
9. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Ануфриев В.Е. Вопросы методического и инструментального обеспечения мониторинга горных выработок. Кемерово: ИУ СО РАН, 2012. 222 с.
10. Черданцев Н.В. Зоны нарушения сплошности в области сопряжения двух выработок квадратного поперечного сечения // Вестник КузГТУ. 2003. № 5. С. 19–21.
11. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Зоны нарушения сплошности в области сопряжения двух горных выработок // Прикладная механика и техническая физика. 2004. № 4. С. 137–139.
12. Черданцев С.В., Черданцев Н.В. О влиянии предварительно обжатой пружины на зону нарушения сплошности вокруг цилиндрической полости // Прикладная механика и техническая физика. 2005. № 3. С. 141–148.
13. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Изаксон В.Ю. Построение областей неустойчивости двухсвязного массива горных пород с прочностной анизотропией // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 8. С. 313–320.
14. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Изаксон В.Ю. Обоснование геомеханической модели разрушения многосвязного массива горных пород с прочностной анизотропией // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отдельный выпуск № 7. С. 122–125.
15. Черданцев Н.В. Влияние анкерной крепи на устойчивость породного массива, вмещающего одиночную выработку // Вестник КузГТУ. 2012. № 4. С. 3–7.
16. Черданцев Н.В. Устойчивость целиков в окрестности системы выработок, сооружаемых в анизотропном по прочности массиве горных пород // Вестник КузГТУ. 2012. № 1. С. 15–19.
17. Черданцев Н.В. Классификация вырезов по степени их влияния на окружающий массив / Н.В. Черданцев, В.Т. Преслер, В.Ю. Изаксон // Вестник КузГТУ. 2006. № 5. С. 3–7.
18. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Разработка модели геомеханического состояния углепородного массива, вмещающего пластовую выработку // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 11. С. 41–45.
19. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Разработка и реализация математической модели геомеханического состояния горного массива, вмещающего угольный пласт и пройденную по нему выработку // Вычислительные технологии. 2017. № 1. С. 84–96.
20. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
21. Кузнецов Г.Н. Предельные состояния твердых горных пород с учетом пространственной ориентировки поверхностей ослабления // Тр. ВНИМИ. 1961. № 43. С. 98–112.
22. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
23. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. М.: Наука, 1981. 688 с.

24. Канторович Л.В., Крылов В.И. Приближённые методы высшего анализа. М.: Л.: Физматгиз, 1962. 708 с.
25. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твёрдого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
26. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твёрдого тела. М.: Мир, 1987. 328 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2018.7.41.004

UDC 622.023.23

© N.V. Cherdantsev, S.V. Cherdantsev, 2018

#### N.V. CHERDANTSEV

Doctor of Engineering Sciences, Principal Researcher

The Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS (Institute of Coal), Kemerovo

e-mail: nvch2014@yandex.ru

#### S.V. CHERDANTSEV

Doctor of Engineering Sciences, Principal Researcher

JSC «NC VostNII», Kemerovo

e-mail: svch01@yandex.ru

### COAL AND ROCK MASSIF BEDDING THE SEAM OPENING AND TECTONIC DEFORMATION GEOMECHANICAL STATE MODEL DEVELOPMENT AND ITS APPLICATION AT MEDIUM STRESSED STATE COLCULATION

*The model of geomechanical state of the coal and rock massif containing mine workings done near the geological fault is presented in the article. The fault has the form of the narrow slit filled with an elastic material with the specified stiffness characteristics for compression and displacement. The model is built on the basis of the main positions of the mechanics of the deformable solid and implemented with the use of the boundary element method. During formulation of boundary condition on the contour of the mine opening a modification of the method of boundary elements in the form of dummy loads is used and boundary conditions on the contour disorders presented in the form of discontinuous displacement method. The conditions for the inelastic deformation occurrence are the strength criterion of Coulomb – Mohr and Mohr - Kuznetsov. The diagram of the seam condition stresses is given as the Prandtl diagram in which the material's ultimate deformation section is horizontal. The epures of the bearing pressure were built in the marginal part of the seam with/without due consideration of the geological fault presented in the form of tectonic deformation. It is shown that when the deformation located horizontally above the working the characteristics of the bearing pressure are higher when it is absent. The presence in the roof a tectonic deformation is the reason for the appearance of horizontal tensile stresses in its rocks, which can reach significant values.*

Keywords: ROCKMASSIF, COAL SEAM, SEAM ULTIMATE STRESS, FRICTION COEFFICIENT, INTERNAL FRICTION ANGLE, MAXIMUM STRESSED ZONES, ROCK STRENGTH THEORY, MINE OPENING, TECTONIC DEFORMATION.

#### REFERENCES

1. Petukhov I.M., Linkov A.M. Mechanics of rock bursts and emissions. Moscow: Nedra, 1983. 280 p. (In Russ.).
2. Chernov O.I., Puzyrev V.N. The forecast of coal and gas sudden outbursts. Moscow: Nedra, 1979. 296 p. (In Russ.).

3. Shinkevich M.V., Kozyrev E.N., Plaksin M.S., Rodin R.I. Methodical bases of forecasting of the dynamics of metrobility extraction coal plot when developing powerful and contiguous layers of long columns. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti = Industrial Safety*. 2017. № 3. pp. 23–29. (In Russ.).
4. Baklashov I.V., Kartoziya B.A. *Mechanics of underground structures and construction of supports*. Moscow: Nedra, 1992. 544 p. (In Russ.).
5. Borisov A.A. *Mechanics of rock and massifs*. Moscow: Nedra, 1980. 360 p. (In Russ.).
6. Turchaninov I.A., Iofis M.A., Kasparian E.V. *Fundamentals of rock mechanics*. Moscow: Nedra, 1989. 488 p. (In Russ.).
7. Fisenko G.L. *Limit state of rocks around an workings*. Moscow: Nedra, 1976. 272 p. (In Russ.).
8. Cherdantsev N.V., Shalamanov V.A. Boundary integral equations in underground constructions mechanics problems. *Izvestiya vuzov «Gornyy zhurnal» = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2004. № 5. pp. 50–54. (In Russ.).
9. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Anufriev V.E. *Issues of methodological and instrumental support of mine workings monitoring*. Kemerovo: IU SB RAS, 2012. 222 p. (In Russ.).
10. Cherdantsev N.V. Zones of rock discontinuity in the interface between two workings with square cross-section. *Vestnic KuzGTU = Vestnik of Kuzbass State Technical University*. 2003. № 5. pp. 19–21. (In Russ.).
11. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Zones of rock discontinuity in the interface between two mine workings. *Prikladnaya mehanika i tehnikeskaya fizika = Applied Mechanics and Applied Physics*. 2004. № 4. pp. 137–139. (In Russ.).
12. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V. Effect of a precompressed spring on the discontinuity zone around a cylindrical cavity. *Prikladnaya mehanika i tehnikeskaya fizika = Applied Mechanics and Applied Physics*. 2005. Vol. 46. № 3. pp. 423–429. (In Russ.).
13. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Isakson V.Yu. Construction of a doubly connected rock massif nonstability areas with strength anisotropy. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2009. № 8. pp. 313–320. (In Russ.).
14. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Isakson V.Yu. Substantiation of multiply connected rock massif with strength anisotropy geomechanical destruction mode. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2009. Separate issue № 7. pp. 122–125. (In Russ.).
15. Cherdantsev N.V. The effect of roof bolting on the stability of a rock mass enclosing a single mine working. *Vestnic KuzGTU = Vestnik of Kuzbass State Technical University*. 2012. № 4. pp. 3–7. (In Russ.).
16. Cherdantsev N.V. Stability of pillars in the system of mine workings constructed in anisotropic rock massif. *Vestnic KuzGTU = Vestnik of Kuzbass State Technical University*. 2012. № 1. pp. 15–19. (In Russ.).
17. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Isakson V.Yu. Classification of cut-outs according to the degree of their influence on the surrounding massif. *Vestnic KuzGTU = Vestnik of Kuzbass State Technical University*. 2006. № 5. pp. 3–7. (In Russ.).
18. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Developing a model of geomechanical condition of coal bearing massif accommodating in-seam working. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2014. № 11. pp. 41–45. (In Russ.).
19. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Development and implementation of a mathematical model of the geomechanical state coal rock mass, enclosing the coal seam and the mine working in it. *Vychislitelnye tekhnologii = Computational technologies*. 2017. № 1. pp. 84–96. (In Russ.).
20. Sokolovski V.V. *Statics of granular media*. Moscow: Nauka, 1990. 272 p. (In Russ.).

21. Kuznetsov G.N. Limiting states of solid mine rock with allowance of the weakening surfaces spatial orientation. Trudy VNIMI = VNIMI Papers. 1961. № 43. pp. 98–112. (In Russ.).
22. Lurie A.I. Theory of elasticity. Moscow: Nauka, 1970. 940 p. (In Russ.).
23. Parton V.Z., Perlin P.I., Mathematical Methods of the Theory of Elasticity. Moscow: Nauka, 1981. 688 p. (In Russ.).
24. Kantorovich L.V., Krylov V.I. Approximate methods of higher analysis. Moscow-Leningrad: Fizmatgiz. 1962. 708 p. (In Russ.).
25. Rabotnov Yu.N. Mechanics of deformable solids. Moscow: Nauka, 1988. 712 p. (In Russ.).
26. Crouch S., Starfield A. Boundary element methods in solid mechanics. Moscow: Mir, 1983. 328 p. (In Russ.).