

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.47.51.004

УДК 622.023.23

© Н.В. Черданцев, 2022

Н.В. ЧЕРДАНЦЕВ

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



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ КРАЕВОЙ ЗОНЫ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ЕГО ОТРАБОТКЕ ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКОЙ

Деформации угольного пласта (уменьшение мощности и отжим) находятся в рамках модели, базирующейся на модели геомеханического состояния массива горных пород, вмещающего пластовые выработки, и основных уравнениях классической теории пластического течения материала.

В модели условием возникновения неупругих деформаций в краевой зоне пласта являются критерии Кулона – Мора. Считается, что угольный пласт, после перехода в неупругое (предельно напряжённое) состояние деформируется без упрочнения при постоянном уровне напряжений, следуя диаграмме Прандтля. В этой связи поле напряжений строится отдельно от полей деформаций и перемещений. Напряжения в предельной зоне определяются методом характеристик, а в упругой области методом граничных элементов. Протяжённость зоны и максимальные напряжения на стыке с упругой областью находятся методом последовательных приближений.

Полученное поле напряжений используется в уравнениях теории течения при построении полей деформаций и перемещений пласта. При этом для определения приращений неупругих деформаций принято допущение о том, что они определяются через компоненты найденного поля напряжений согласно закону Гука, в котором коэффициент Пуассона соответствует чисто пластичному материалу.

Ключевые слова: МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ОЧИСТНАЯ ВЫРАБОТКА, ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫЕ ЗОНЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ, ЛИНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ, КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ КУЛОНА – МОРА.

ВВЕДЕНИЕ

Очевидно, что для безопасного применения высокопроизводительных технологий отработки угольных пластов необходимо их геомеханическое обоснование, т. е. проведение всесторонних исследований напряжённо-деформированного состояния и массива, и самих пластов в рамках математических моделей, построенных на базе фундаментальных методов механики деформируемого твёрдого тела.

Характер распределения поля напряжений в краевой зоне угольного пласта при его отработке является определяющим фактором в оценке опасности выбросов угля и газа из забоя выработки, а также при выборе размеров целиков. В этой связи изучению напряжённого состояния углепородного массива посвящено достаточно много научной литературы по горному делу, например, [1–5]. Однако проблемам деформированного состо-

яния угольно пласта в процессе его отработки уделено значительно меньше внимания.

Основными фундаментальными методами расчёта углепородного массива являются метод конечных элементов (МКЭ), метод дискретных элементов (МДЭ), метод граничных элементов (МГЭ). У этих методов есть достоинства и недостатки.

Метод конечных элементов решает задачи о напряжённо-деформированном состоянии массива, вмещающего выработки, в том числе и очистные. Достоинство метода состоит в том, что он учитывает неоднородную структуру массива [6, 7]. К недостаткам следует отнести то обстоятельство, что при формулировании условий перехода в предельное состояние горных пород применяются классические критерии, используемые для пластичных материалов, а не общий и специальный критерии Кулона – Мора. Это обстоятельство существенно влияет на параметры опорного давления (максимум напряжений, ширину предельно напряжённой зоны) в краевой зоне пласта.

Метод дискретных элементов хорошо работает со средами с низкими параметрами связности, но в достаточно прочных массивах он редко используется [8].

Метод граничных элементов успешно применяется для исследования напряжённого состояния массива с прочностной анизотропией [9], однако, недостатком метода является сложность в учёте неоднородности физических (упругих) свойств массива [10]. При расчёте углепородного массива, вмещающего очистную выработку, этот метод можно использовать для построения поля напряжений, предварительно построив методом характеристик поле напряжений в угольном пласте [11]. В этом отношении он достаточно детально оценивает напряжённое состояние массива и довольно точно определяет параметры опорного давления пласта [12, 13]. Для построения полей деформаций и смещений в предельно напряжённой зоне пласта метод ранее не применялся.

На базе метода граничных элементов и специального критерия Кулона – Мора, формулирующего условия прочности только по

поверхностям ослаблений, разработана модель геомеханического состояния анизотропного по прочности массива, вмещающего систему выработок, которая с успехом применялась для оценки устойчивости массива в окрестности выработок и мероприятиям по её повышению [14–17]. Использование в этой модели метода характеристик [18] для описания предельного состояния пласта, критериями наступления которого являются оба критерия (общий и специальный) Кулона – Мора, позволило применять усовершенствованную модель для определения параметров опорного давления в пластовых выработках. Найденное в рамках модели поле напряжений в окружающем массиве может быть использовано при построении траектории трещины гидроразрыва для разупрочнения «тяжёлой» кровли пласта [13].

Однако, для оценки ряда геодинамических явлений необходимо знать не только распределение поля напряжений и величину максимальных напряжений, но располагать информацией о максимальном уровне деформаций и смещений участков пласта. Если диаграмма испытания угольного образца, предварительно выделенного из обрабатываемого пласта, имеет ограниченный участок текучести, при достижении которого он моментально разрушается, то для оценки геодинамического явления в форме горного удара необходимо располагать картиной деформирования пласта, расположенного в предельно напряжённой зоне.

В представленной статье построено решение на основе классической теории пластического течения и приведены результаты решения задачи о деформированном состоянии пласта. При решении задачи использовано поле напряжений, полученное в рамках ранее разработанной модели анизотропного по прочности углепородного массива.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЕЁ РЕШЕНИЯ

В краевой области угольного пласта, обрабатываемого на всю мощность очистной выработкой размерами $b \times h$, расположенной на глубине H , образуются в предельно на-

пряжённые зоны (зоны неупругого состояния пласта). Параметры зоны (максимум опорного давления и её ширина), а также поле напряжений в пласте определены в рамках разработанной модели геомеханического состояния углепородного массива, вмещающего пласт и проходимую по нему выработку.

Основными исходными данными задачи приняты следующие параметры среды: предел прочности пласта на одноосное сжатие σ_0 , его коэффициент сцепления K , а также угол внутреннего трения ρ . Коэффициент сцепления K' и угол внутреннего трения ρ' по контактам пласта с окружающим массивом.

Система координат xyz совпадает с центральными осями поперечного сечения выработки, а ось x совпадает с осью выработки.

В этой модели поле напряжений в предельно напряжённой зоне структурно однородно пласта может быть построено без рассмотрения деформированного состояния пласта, поскольку массив в окрестности протяжённой выработки, к которой относится и очистная выработка (её длина значительно больше ширины), находится в условиях плоского деформированного состояния. Следовательно, решение задачи сводится к интегрированию системы дифференциальных уравнений равновесия совместно с общим критерием прочности Кулона – Мора в форме:

$$\sigma_1 - \beta\sigma_3 = \sigma_0. \quad (1)$$

где σ_1, σ_3 — главные напряжения, а параметр объёмной прочности β определяется по следующей формуле [18]:

$$\beta = \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho}.$$

Решение такой системы уравнений, которая является нелинейной, находится методом характеристик. Суть метода заключается в построении линий, называемых характеристическими, вдоль которых нелинейная система дифференциальных уравнений имеет более простой вид и, поэтому легче интегри-

руется. Физически эти линии совпадают с линиями скольжения части пласта, расположенного в зоне неупругого деформирования.

Поскольку в предельно напряжённой зоне пласт деформируется не только по направлению его мощности, но и вдоль контакта с окружающими породами, где происходит его проскальзывание, то в нём одновременно реализуются два предельных состояния равновесия: общее или обыкновенное (состояние самого пласта) и специальное (состояние по контакту пласта с окружающим массивом) [3, 19]. Эти два условия соответствуют критериям Кулона – Мора для прямолинейных огибающих кругов предельных состояний по пласту и по контакту пласта с массивом.

В этой связи характер распределения эпюр напряжений вдоль контакта пласта и массива, а также вдоль оси пласта представляет вид попеременно сменяющихся постоянных и нелинейных участков [3, 11]. При решении упругопластической задачи о состоянии углепородного массива с пластовой выработкой, ступенчато меняющиеся эпюры напряжений аппроксимируются монотонными функциями в виде полиномов, степень которых определяется протяжённостью предельно напряжённой зоны [11, 13].

Граница смены пластических и упругих деформаций определяется из решения упругопластической задачи, которая путём замены предельно напряжённых зон пласта реактивными усилиями, действующими на границах этих зон, сводится ко второй внешней краевой задаче теории упругости и решается методом интегральных уравнений (граничных элементов) [19, 21]. Стыковка решения упругой и пластической задач производится методом последовательных приближений [13]. Эпюра вертикальных нормальных напряжений, построенная в ходе стыковки, является эпюрой опорного давления на угольный пласт. Её параметрами являются величина нормального напряжения на границе упругой и пластической областей, а также протяжённость предельно напряжённой (пластической) зоны пласта.

Следует отметить, что согласно зависимо-

сти (1) во всех точках предельно напряжённой зоны соотношение между главными напряжениями $\sigma_1 - \beta\sigma_3$ постоянно и равно σ_0 , следовательно, деформирование пласта происходит при постоянной интенсивности напряжений σ_u , равной пределу прочности σ_0 пласта. Это значит, что угольный пласт деформируется в соответствии с диаграммой Прандтля, т. е. без упрочнения.

В классической теории пластичности для определения напряжённо-деформированного состояния пластической не упрочняющейся среды используют зависимости ассоциированного закона пластического течения [22, 23].

Согласно этому закону дифференциальные приращения пластических деформаций $d\varepsilon$ определяются следующим образом:

$$d\varepsilon_j = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_j} \quad (j=1, 2, 3), \quad (2)$$

В выражении f — функция пластичности принимается в соответствии с выбранным критерием прочности [19, 22], $d\lambda$ — дифференциально малый параметр, являющийся коэффициентом пропорциональности между компонентами дифференциальных приращений пластических деформаций и приращений дифференциалов напряжений. Приращение деформации $d\varepsilon_2$ равно нулю, поскольку в условиях плоского деформированного состояния деформация вдоль оси, совпадающей с осью выработки x ($\varepsilon_2 = \varepsilon_x$), равна нулю.

Функция пластичности в данной задаче — это критерий Кулона – Мора (1) и, следовательно, функция пластичности представляется следующим образом [19]:

$$f = \sigma_1 - \beta\sigma_3 - \sigma_0 \quad (3)$$

а параметр $d\lambda$ определяется согласно следующей зависимости [22, 23]:

$$d\lambda = \frac{3d\varepsilon_u}{2\sigma_u}. \quad (4)$$

В формуле (4) $d\varepsilon_u$ — интенсивной приращений пластических деформаций, σ_u — интенсивность напряжений.

После подстановки выражения (3) в зависимость (2) получаются следующие выражения для приращений деформаций и соотношение между ними.

$$d\varepsilon_1 = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_1} = d\lambda, \quad d\varepsilon_3 = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_3} = -d\lambda\beta$$

и $d\varepsilon_3 = -\beta d\varepsilon_1. \quad (5)$

Отсюда следует, что, что изменение объёма dV , равного сумме деформаций, не равно нулю, как это принято для пластичного материала:

$$dV = d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = d\varepsilon_1 - \beta d\varepsilon_1 \neq 0.$$

Интенсивность приращений деформаций определяется следующей зависимостью [23]

$$d\varepsilon_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot$$

$$\sqrt{(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2)^2 + (d\varepsilon_2 - d\varepsilon_3)^2 + (d\varepsilon_3 - d\varepsilon_1)^2}. \quad (6)$$

После подстановки приращений деформаций из выражений (5) в зависимость (6) некоторых преобразований с учётом $d\varepsilon_2 = 0$ получается следующее выражение для интенсивности приращений деформаций:

$$d\varepsilon_u = \frac{d\varepsilon_1 \sqrt{2}}{3} \sqrt{1 + \beta^2 + (\beta + 1)^2} =$$

$$= \frac{2d\varepsilon_1}{3} \sqrt{1 + \beta + \beta^2}. \quad (7)$$

В этой статье принято допущение о том, что значения $d\varepsilon_1$ в разных точках предельно напряжённой зоны пласта определяются согласно закону Гука, в котором коэффициент

Пуассона μ принят равным 0,5 (а в упругой области — 0,29), т. е. значению коэффициента Пуассона для пластичного материала:

$$d\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [d\sigma_1 - \mu(d\sigma_2 + d\sigma_3)]. \quad (8)$$

В формуле (8) E — модуль упругости пласта, а σ_2 в условиях плоской деформации определяется следующим образом:

$$d\sigma_2 = \mu(d\sigma_1 + d\sigma_3). \quad (9)$$

После подстановки формулы (9) в выражение (8) оно принимает следующий вид:

$$d\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [d\sigma_1 - \mu(d\sigma_2 + d\sigma_3)]. \quad (10)$$

Интенсивность напряжений σ_u в предельно напряжённой зоне пласта, деформирующегося согласно диаграмме Прандтля, как уже отмечено выше, равно его пределу прочности на одноосное сжатие $\sigma_u = \sigma_0$.

Пластические приращения деформаций определяются по следующим формулам [23]:

$$d\varepsilon_{1.p\Lambda} = \frac{3d\varepsilon_u}{2\sigma_u} (\sigma_1 - \sigma_{cp}),$$

$$d\varepsilon_{3.p\Lambda} = -\beta d\varepsilon_{1.p\Lambda}, \quad d\varepsilon_{2.p\Lambda} = 0. \quad (11)$$

В формулах (11) σ_{cp} — средние напряжения, которые с учётом (9), равны следующему выражению

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{(1 + \mu)(\sigma_1 + \sigma_3)}{3}. \quad (12)$$

Если перейти от дифференциальных соотношений к их конечным соотношениям, разбив предельно напряжённую зону (зону пластичности) на конечное число равных участков N , то соотношение (10) для проме-

жуточной точки i принимает следующий вид:

$$\Delta\varepsilon_{1,i} = \frac{1}{E} \left[(1 - \mu^2) \Delta\sigma_{1,i} + \mu(1 - \mu) \Delta\sigma_{3,i} \right], \quad (13)$$

где приращения $\Delta\varepsilon$, $\Delta\sigma$ выражаются следующим образом:

$$\Delta\varepsilon_{u,i} = \varepsilon_{1,i} - \varepsilon_{1,i-1}, \quad \Delta\sigma_i = \sigma_{1,i} - \sigma_{1,i-1}. \quad (14)$$

С учётом соотношений (14) выражение (13) принимает следующий вид:

$$\Delta\varepsilon_{u,i} = \frac{2}{3E} \sqrt{1 + \beta + \beta^2} \left[(1 - \mu^2)(\sigma_{1,i} - \sigma_{1,i-1}) + \mu(1 - \mu)(\sigma_{3,i} - \sigma_{3,i-1}) \right], \quad (15)$$

а выражения (11) представляются следующим образом:

$$\Delta\varepsilon_{1.p\Lambda,i} = \frac{3\Delta\varepsilon_{u,i}}{2\sigma_0} (\sigma_{1,i} - \sigma_{cp,i}),$$

$$\Delta\varepsilon_{3.p\Lambda,i} = -\beta \Delta\varepsilon_{1.p\Lambda,i}. \quad (16)$$

Очевидно, что для определения деформаций в произвольной точке n , расположенной в пределах пластической зоны (между границей с упругой областью пласта и его кромкой) необходимо просуммировать соответствующие деформации (16) всех промежуточных участков, и выражения для пластических деформаций в точке n примет следующий вид:

$$\varepsilon_{u,n} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{u,i}, \quad \varepsilon_{1.p\Lambda,n} = \sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon_{1.p\Lambda,i},$$

$$\varepsilon_{3.p\Lambda,n} = -\beta \sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon_{1.p\Lambda,i}. \quad (17)$$

Соотношения (15) – (17) полностью определяют поле деформаций в предельно напряжённой зоне пласта. Однако, построить

картину деформирования пласта, используя полученные решения в напряжениях, достаточно сложно, поскольку построение линий скольжения и определение на них напряжений производится численно. В этой связи построение поля напряжений сведено к построению напряжений только вдоль кровли пласта и вдоль его оси. Как уже отмечено выше, эпюры напряжений вдоль этих направлений аппроксимированы полиномами различных степеней, а, отличие в результатах расчётов главных нормальных напряжений вдоль этих направлений незначительно. В этой связи в данной статье также представлены результаты расчёта деформированного состояния только в направлении оси пласта. При этом полагается, что деформации вдоль оси пласта и вдоль его кровли близки друг к другу, поскольку эпюры главных напряжений вдоль этих направлений практически совпадают.

Для построения поля перемещений нужно воспользоваться дифференциальными соотношениями Коши:

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (17)$$

где v — перемещение точки деформируемого тела вдоль оси y , w — перемещение точки вдоль оси z .

В конечной разностной форме выражения представляются в следующей форме:

$$\varepsilon_{y,i} = \frac{v_i - v_{i-1}}{\Delta y}, \quad \varepsilon_{z,i} = \frac{w_i - w_{i-1}}{\Delta z}, \quad (18)$$

где Δy , Δz — шаги приращения координат, принятые в задаче постоянными.

Из выражений (18) получаются рекуррентные соотношения для вычисления перемещения текущих точек по их значениям в предыдущих точках и ранее вычисленным деформациям:

$$\begin{aligned} v_i &= v_{i-1} + \varepsilon_{y,i} \Delta y, \\ w_i &= w_{i-1} + \varepsilon_{z,i} \Delta z. \end{aligned} \quad (19)$$

Следует отметить, что деформация точки, лежащей на границе упругой и пластической областей, считается упругой. Кроме этого, поскольку деформация ε_z изменяется только вдоль оси y , то перемещение w точек пласта следует искать относительно точек пласта, не перемещающихся вертикально. Эти точки в силу симметрии пласта относительно оси y находятся на ней.

В этой связи можно ограничиться определением перемещений точек кровли пласта относительно его оси. Тогда выражение для w_i из (19) принимает следующий вид:

$$w_i = w_{i-1} + \varepsilon_{z,i} h / 2. \quad (20)$$

Таким образом, зависимости (19), (20) позволяют построить перемещения точек кровли (почвы) пласта.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И ИХ АНАЛИЗ

В рамках изложенной модели проведён вычислительный эксперимент, за исходные данные в котором приняты следующие параметры массива, выработки и пласта: $H = 600$ м, $\gamma = 25$ кН/м³, $E = 2 \cdot 10^3$ МПа, $\sigma_0 = 10$ МПа, $\rho = 20^\circ$, $\rho_s = 20^\circ$, $\rho' = 10^\circ$, $K' = 0$, $\rho' = 10^\circ$, $b = 25$ м, $h = 3$ м,

На рис. 1 показаны эпюры нормальных σ_z (кривые 1, 2) и касательных τ_{yz} (кривые 3, 4) напряжений, построенные вдоль кровли пласта. Эпюры 1, 3 построены в предельно напряжённой зоне, а кривые 2, 4 — в упругой области. Параметры опорного давления (максимальные нормальные напряжения $\sigma_{z,max}$, ширина предельно напряжённой зоны L) принимают следующие значения: $\sigma_{z,max} = 3,024 \gamma H$ (45,36 МПа), $L = 7$ м.

На рис. 2 представлены эпюры нормального напряжения σ_z (кривые 1, 2) и нормального напряжения σ_y (кривые 3, 4) напряжений, построенные вдоль оси пласта. Эпюры 1, 3 построены в предельно напряжённой зоне, а эпюры 2, 4 — в упругой области. Максимальное нормальное напряжение $\sigma_{z,max} = 3,102 \gamma H$ (46,53 МПа). Максимальное значение $\sigma_{y,max}$ равно $1,628 \gamma H$ (24,435 МПа), и оно находится

в упругой области пласта. На границе упругой области и предельно напряжённой зоны σ_y составляет $1,188 \gamma H$ (17,814 МПа).

Из сравнения максимальных значений σ_z в кровле пласта и на его оси следует, что они незначительно отличаются друг от друга.

Как уже было отмечено ранее, в силу сим-

метрии пласта относительно его оси (оси y) касательные напряжения отсутствуют, а нормальные напряжения σ_y, σ_z являются главными напряжениями, причём $\sigma_1 = \sigma_z$, а $\sigma_3 = \sigma_y$. Деформации на оси x также являются главными: $\epsilon_1 = \epsilon_z, \epsilon_3 = \epsilon_y$.

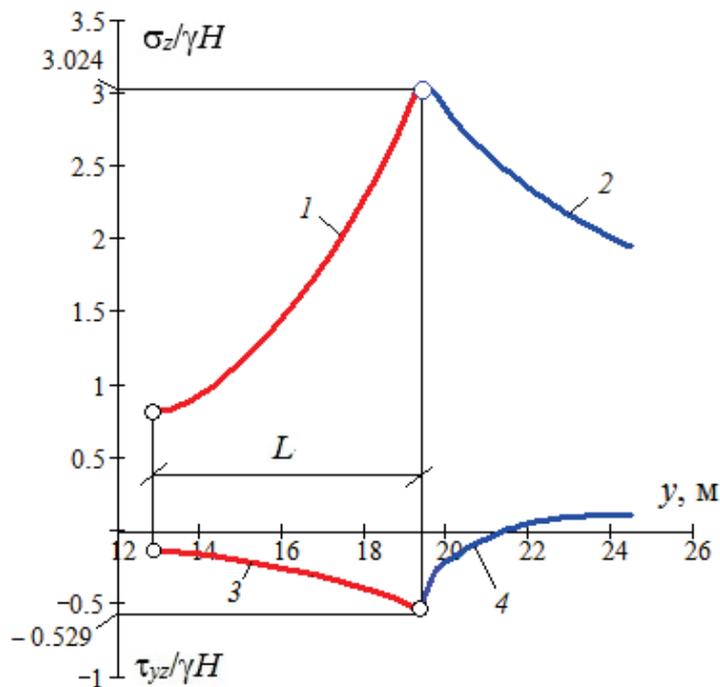


Рис. 1. Эпюры нормальных σ_z (кривые 1, 2) и касательных τ_{yz} напряжений (кривые 3, 4), построенные вдоль кровли пласта

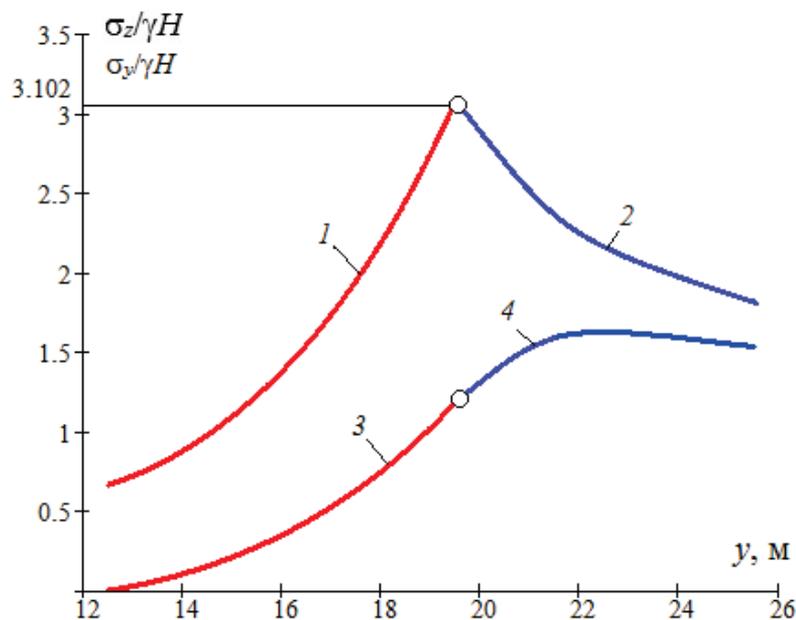


Рис. 2. Эпюры нормальных напряжений σ_z (кривые 1, 2) и σ_y (кривые 3, 4), построенные вдоль оси пласта

На рис. 3 по приведённым выше зависимостям построены графики зависимости деформаций пласта в предельно напряжённой зоне в зависимости от координаты y . При расчётах предельно напряжённая зона была разделена на тысячу равных интервалов.

На рис. 3а построен график интенсивности деформаций ϵ_u , и его максимальное значение, равное 0,021, приходится на кромку пласта. Значение интенсивности деформаций является одним из показателей прочности угольного пласта, поскольку использование критерия Кулона – Мора при переходе его в предельное состояние предполагает, что он может деформироваться неограниченно,

следуя диаграмме Прандтля. Однако, реальный пласт имеет на ней ограниченный участок пластичности. Достигнув предельного значения ϵ_u , он может внезапно разрушиться. В этой связи для оценки прочности пласта необходимо иметь диаграмму условных напряжений, построенную в ходе испытания образцов.

На рис. 3б показаны графики деформаций ϵ_y (кривая 1) и деформаций ϵ_z (кривая 2). Из рисунка следует, что горизонтальная деформация ϵ_y значительно превышает вертикальную деформацию ϵ_z . Их максимальные значения достигаются на кромке пласта, причём, $\epsilon_{y,max} = 0,06$, а $\epsilon_{z,max} = 0,028$.

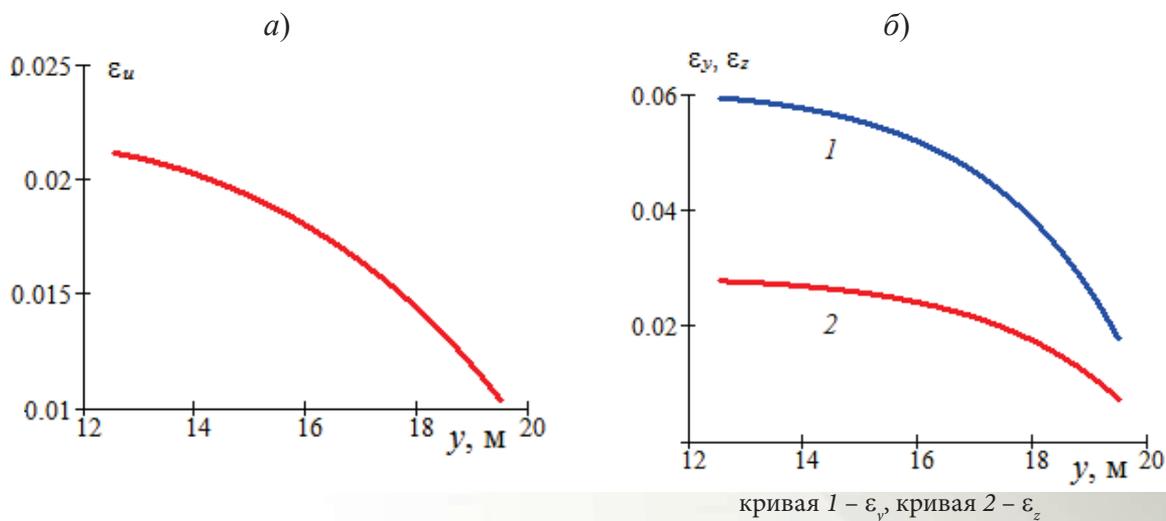


Рис. 3. Эпюры интенсивности деформаций ϵ_u (а) и деформаций ϵ_y, ϵ_z (б) в предельно напряжённой зоне на оси пласта

Перемещения точек оси (кровли) пласта вычислены по формулам (19), (20). Результаты представлены на рис. 4. Для удобства значения перемещений взяты по модулю, поскольку на самом деле направления перемещения точек не совпадают с положительными направлениями осей y, z . Максимальное горизонтальное перемещение (отжим пласта) про-

исходит на кромке пласта, при этом она смещается внутрь выработки на 0,315 м, а кровля пласта на кромке смещается вниз на 0,042 м.

Следует отметить, что почва пласта, наоборот перемещается на такую же величину вверх. В этой связи, мощность пласта на кромке уменьшается на 0,084 м.

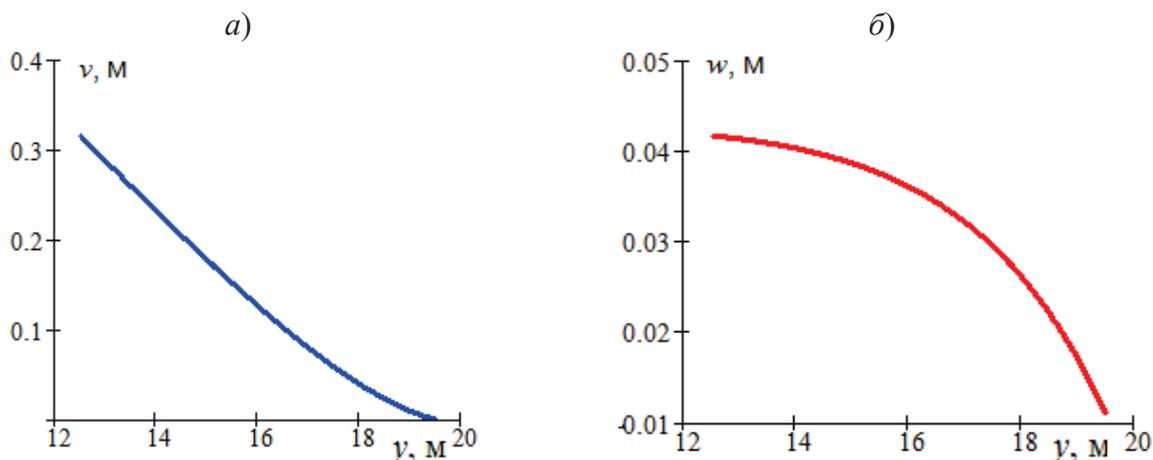


Рис. 4. Эпюры перемещений точек в предельно напряжённой зоне кровли пласта: вдоль оси $y - v$ (а), вдоль ост $z - w$ (б) на оси пласта

На рис. 5 показана схема перемещения точек кровли пласта в предельно напряжённой зоне в результате его деформирования. Из рисунка видно, что в процессе деформирования

пласта он смещается вниз и влево, причём горизонтальное смещение (выпирание внутрь выработки) в несколько раз превышает величину относительно сжатия пласта.

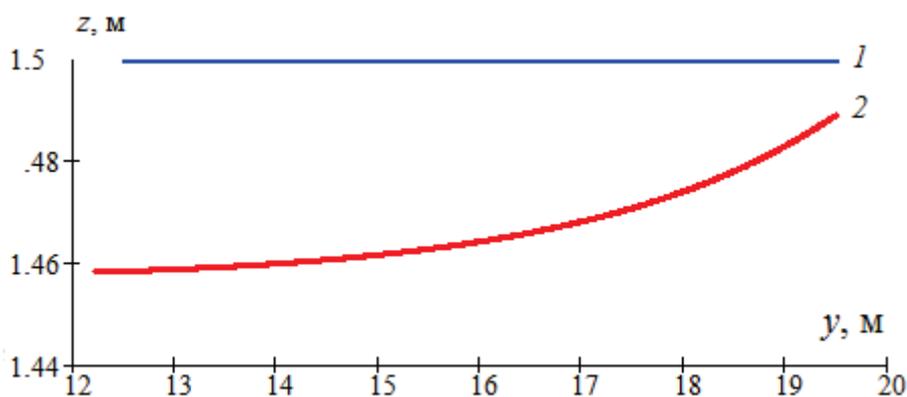


Рис. 5. Схема перемещений кровли пласта в предельно напряжённой зоне. 1 — положение кровли пласта в нетронутом массиве, 2 — положение кровли после деформирования

ВЫВОДЫ

1. Задача о напряжённо-деформированном состоянии краевой области пласта при отработке очистной выработкой относится к классу упругопластических задач и решается методами различных разделов механики деформируемого твёрдого тела. Так, например, распределение напряжений в предельно напряжённой зоне находится методами механики сыпучей среды, а параметры опорного давления определяются методом граничных элементов в ходе решения задачи теории упругости. Построение же поля деформаций

и перемещений осуществляется методами теории пластического течения на основе найденного поля напряжений.

2. Применение ассоциированного закона пластического течения, в котором функция пластичности представлена критерием прочности Кулона – Мора, к оценке деформированного состояния пласта показывает, что угольный пласт в его предельно напряжённой зоне не является несжимаемым, а горизонтальная деформация значительно превышает вертикальную деформацию. В этой связи выпирание пласта внутрь выра-

ботки в несколько раз превосходит абсолютную деформацию его мощности.

3. Для оценки прочности угольного пласта, который деформируется как пластичное тело, следуя диаграмме деформирования Прандтля, кроме построения поля напряже-

ний в пласте необходимо определять и поле деформаций, поскольку реальный пласт имеет ограниченный участок текучести на диаграмме Прандтля, при достижении которого может произойти внезапное его разрушение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. М.: Углетехиздат, 1954. 384 с.
2. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.
3. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
4. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
5. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. Л.: Недра, 1989. 488 с.
6. Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. Новосибирск: Наука, 2005. 132 с.
7. Риб С.В., Серяков В.М., Фрянов В.Н. Геомеханическое обеспечение подземной отработки угольных пластов сложного строения в условиях Кузбасса. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. 144 с.
8. Клишин В.И., Клишин С.В. Исследование процессов выпуска угля при отработке мощных пологих и крутых угольных пластов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2010. № 2. С. 69–81.
9. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Ануфриев В.Е. Вопросы методического и инструментального обеспечения мониторинга горных выработок. Кемерово: Институт угля СО РАН, 2012. 222 с.
10. Черданцев Н.В., Преслер В.Т. Моделирование геомеханического состояния анизотропного по прочности неоднородного массива горных пород // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. № 3. С. 15–22.
11. Черданцев Н.В. Исследование предельно напряжённого состояния пласта в его краевой зоне методами механики сыпучей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3. С. 45–57.
12. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Анализ состояния углепородного массива, вмещающего пластовую выработку и геологическое нарушение // Известия РАН Механика твёрдого тела. 2018. № 2. С. 110–121.
13. Черданцев Н.В. Один из подходов к построению траектории трещины гидроразрыва в массиве горных пород вблизи горной выработки // Прикладная математика и механика. 2020. № 2. С. 208–233.
14. Черданцев Н.В., Изаксон В.Ю. Некоторые трёхмерные и плоские задачи геомеханики. Кемерово: КузГТУ, 2004. 190 с.
15. Черданцев Н.В. Устойчивость целиков в окрестности системы, сооружаемых в анизотропном по прочности массиве горных пород // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 1. С. 15–19.
16. Черданцев Н.В. Влияние анкерной крепи на устойчивость породного массива, вмещающего одиночную выработку // Вестник КузГТУ. 2012. № 4. С. 3–7.
17. 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.

18. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
19. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1994. 382 с.
20. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
21. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. М.: Наука, 1981. 688 с.
22. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
23. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1990. 400 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2022.47.51.004

UDC 622.023.23

© N.V. Cherdantsev, 2022

N.V. CHERDANTSEV

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: nvch2014@yandex.ru

DETERMINATION OF DEFORMATIONS OF COAL SEAM EDGE ZONE DURING ITS MINING BY MINING

Deformations of the coal seam (reduction in thickness and squeezing) are within the framework of a model based on the model of the geomechanical state of the rock mass containing formation workings, and the basic equations of the classical theory of plastic flow of material.

In the model, the condition for the occurrence of inelastic deformations in the marginal zone of the formation is the Coulomb – Mora criteria. It is believed that the coal seam, after transition to an inelastic (extremely stressed) state, deforms without strengthening at a constant level of stress, following the Prandtl diagram. In this regard, the stress field is constructed separately from the fields of deformations and displacements. Stresses in the limit zone are determined by the method of characteristics, and in the elastic region by the method of boundary elements. The length of the zone and the maximum stresses at the junction with the elastic region are found by the method of successive approximations.

The resulting stress field is used in the equations of the theory of flow in the construction of fields of deformation and movement of the formation. In this case, to determine the increments of inelastic deformations, it is assumed that they are determined through the components of the found stress field according to Hooke's law, in which the Poisson coefficient corresponds to a purely plastic material.

Keywords: ROCK MASS, COAL SEAM, TREATMENT WORK, EXTREMELY STRESSED ZONES, STRENGTH CHARACTERISTICS, SLIDING LINES, COULOMB – MOHR STRENGTH CRITERION.

REFERENCES

1. Ruppeneyt K.V. Some Questions of Rock Mechanics. M.: House of Coal. 1954. 384 p. [In Russ.].
2. Borisov A.A. Mechanics of rock and arrays. M.: «Nedra», 1980. 360 p. [In Russ.].
3. Fisenko G.L. For the Limit state of rocks around an excavation. M.: «Nedra», 1976. 272 p. [In Russ.].

4. Petukhov I.M., Linkov A.M. Mechanics of rock impacts and emissions. Moscow: «Nedra», 1983. 280 p. [In Russ.].
5. Turchaninov I.A., Iofis M.A., Kasparyan E.V. Fundamentals of rock mechanics. Moscow: «Nedra», 1989. 488 p. [In Russ.].
6. Kurlenya M.V., Seryakov V.M., Eremenko A.A. Technogenic geomechanical stress fields. Novosibirsk: Nauka, 2005. 132 p. [In Russ.].
7. Rib S.V., Seryakov V.M., Fryanov V.N. Geomechanical support of underground mining of coal seams of complex structure in the conditions of Kuzbass. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2022. 144 p. [In Russ.].
8. Klishin V.I., Klishin S.V. Investigation of coal production processes during the development of powerful shallow and steep coal seams // Physico-technical problems of mineral development [Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh]. 2010. No. 2. P. 69–81. [In Russ.].
9. Cherdantsev N.V., Preisler V.T., Anufriev V.E. Issues of methodological and instrumental support for monitoring of mine workings. Kemerovo: Institute of Coal SB RAS, 2012. 222 p. [In Russ.].
10. Cherdantsev N.V., Preisler V.T. Modeling of the mechanical state of an anisotropic inhomogeneous rock mass in terms of strength // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2011. No. 3. P. 15–22. [In Russ.].
11. Cherdantsev N.V. Investigation of the extremely stressed state of the formation in its marginal zone by methods of mechanics of a loose medium // Mining information and analytical bulletin [Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten]. 2020. No. 3. P. 45–57. [In Russ.].
12. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Analysis of the state of a carboniferous massif containing plast mining working and geological disturbance // Proceedings of the Russian Academy of Sciences Solid Mechanics [Izvestiya RAN Mekhanika tvyordogo tela]. 2018. No. 2. P. 110–121. [In Russ.].
13. Cherdantsev N.V. One of the approaches to constructing the trajectory of a hydraulic fracture in a rock mass near a mine workings // Applied mathematics and mechanics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 2020. No. 2. P. 208–233. [In Russ.].
14. Cherdantsev N.V., Izakson V.Yu. Some three-dimensional and planar problems of geomechanics. Kemerovo: KuzSTU, 2004. 190 p. [In Russ.].
15. Cherdantsev N.V. Stability of pillars in the vicinity of a system mining working in an anisotropic rock mass in terms of strength // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2012. No. 1. P. 15–19. [In Russ.].
16. Cherdantsev N.V. The influence of anchor support on the stability of a rock mass containing a single mining // Bulletin of the Kuzbass State Technical University [Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta]. 2012. No. 4. P. 3–7. [In Russ.].
17. Cherdantsev N.V., Preisler V.T., Izakson V.Yu. Construction of instability regions of a two-connected in massif with strength anisotropy // Mining information and analytical bulletin [Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten]. 2009. No. 8. P. 313–320. [In Russ.].
18. Sokolovsky V.V. Loose Medium Statics. Moscow: «Nauka», 1990. 272 p. [In Russ.].
19. Bulychev N.S. Mechanics of underground structures. M.: «Nedra», 1994. 382 p. [In Russ.].
20. Lurie A.I. Theory of Elasticity. Moscow: «Nauka», 1970. 940 p. [In Russ.].
21. Parton V.Z., Perlin P.I. Methods of Mathematical Theory of Elasticity. Moscow: «Nauka», 1981. 688 p. [In Russ.].
22. Kachanov L.M. Fundamentals of plasticity theory. M.: «Nauka», 1969. 420 p. [In Russ.].
23. Alexandrov A.V., Potapov V.D. Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. Moscow: Higher School, 1990. 400 p. [In Russ.].