

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.60.59.001

УДК 622.023.23

© Н.В. Черданцев, 2023

Н.В. ЧЕРДАНЦЕВ

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



ОБ ОДНОМ ТЕОРЕТИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К РАСЧЁТУ ПРОЧНОСТИ УГОЛЬНОГО ЦЕЛИКА С НЕПРОЧНЫМ ПРОСЛОЙКОМ

В рамках ранее разработанной модели геомеханического состояния анизотропного по прочности массива горных пород, вмещающего пластовые выработки, проведены исследования напряжённого состояния угольного целика, вмещающего «слабый» прослойка. Целик расположен между очистной выработкой, приближающейся к панельной подготовительной выработке.

Модель основана на ряде фундаментальных методов механики деформируемого твёрдого тела. Для построения поля напряжений во вмещающем массиве используется метод граничных интегральных уравнений, а напряжённое состояние краевой зоны пласта, которое находится в предельно напряжённом состоянии и испытывает неупругое деформирование, определяется методом характеристик. Протяжённость предельно напряжённой зоны и максимальные напряжения на стыке её с упругой областью пласта (максимум опорного давления) находятся методом последовательных приближений.

Приведены сравнительные оценки параметров опорного давления в угольном целике структурно однородного пласта (без прослойка) и при наличии в нём непрочного прослойка. Показано, что содержание «слабого» прослойка увеличивает параметры краевой предельно напряжённой зоны пласта (протяжённость зоны и максимум опорного давления) по сравнению с аналогичными параметрами в структурно однородном пласте.

Ключевые слова: МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, НЕПРОЧНЫЙ ПРОСЛОЕК, ОЧИСТНАЯ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ ВЫРАБОТКИ, ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫЕ ЗОНЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ, ЛИНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ, КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ КУЛОНА – МОРА.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании угледобывающего предприятия и подготовке к отработке шахтных полей длинными столбами по простиранию чрезвычайно важным и ответственным моментом является выбор параметров целиков: между очистной выработкой и па-

нельной подготовительной выработкой типа уклона или бремсберга. Обоснованные размеры целиков обеспечивают безопасную работу шахты.

В ходе решения задачи об установлении рационального размера угольного целика, расположенного между выработками, строят-

ся эпюры опорного давления вдоль его кровли, определяются коэффициенты концентрации напряжений в окрестности каждой выработки, размеры предельно напряжённых зон около выработок, вычисляются действующие (фактические) и предельные нагрузки на целик, а также коэффициенты запаса прочности [1–5].

Коэффициент запаса прочности определяется как отношение предельной (разрушающей) нагрузки на целик и действующей на него нагрузки. В зависимости от типа целика, горно-геологических условий месторождения, горнотехнических условий его разработки коэффициент запаса прочности регламентируется в пределах от 1,5 до 4 единиц [1].

В данной статье представлены результаты расчёта угольного целика между двумя выработками, полученными в рамках модели геомеханического состояния углепородного массива. В этой модели краевая зона пласта впереди очистного забоя и в борту подготовительной выработки находятся в предельно напряжённом состоянии. Часть слоя обрушенных пород позади очистного забоя, представляющая сыпучий материал, также находится в предельно напряжённом состоянии.

В ряде работ [6–11] представлены результаты решения задач о напряжённом состоянии в окрестности и одиночных пластовых выработок [6], и системы пластовых выработок [7–11]. В этих работах показаны результаты решения задач о предельно напряжённом состоянии как структурно однородного пласта [6], так и при наличии в нём непроч-

ного прослойка [7], а кроме этого учтено различие в характеристиках прочности самого пласта и на его контакте с окружающим массивом. Приведены сравнительные оценки параметров опорного давления в краевой зоне пласта.

В представляемой статье приведены результаты решения задачи о состоянии целика при наличии в угольном пласте непрочного прослойка. Кроме этого, даны сравнительные оценки с результатами решения задачи о состоянии целика в структурно однородном пласте.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЕЁ РЕШЕНИЯ

Расчётная схема задачи показана на рис. 1. Очистная выработка 1 прямоугольного поперечного сечения размерами $b_{ov} \times h$ с помощью механизированного комплекса 2 отрабатывает угольный пласт 3 с расположенным в нём непрочным прослойком 4 на всю его мощность m . До начала ведения очистных работ на глубине H массив нагружен равнокомпонентным гравитационным давлением γH (γ — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород).

Позади очистной выработки образуется слой обрушенных пород 5 мощностью h_o , определяемой из условия их полного подбучивания. Угол сдвижения обрушенных пород ψ . Очистная выработка движется к панельной подготовительной выработке 6 пролётом b_{mv} . Между очистной и подготовительными выработками остаётся угольный целик шириной c .

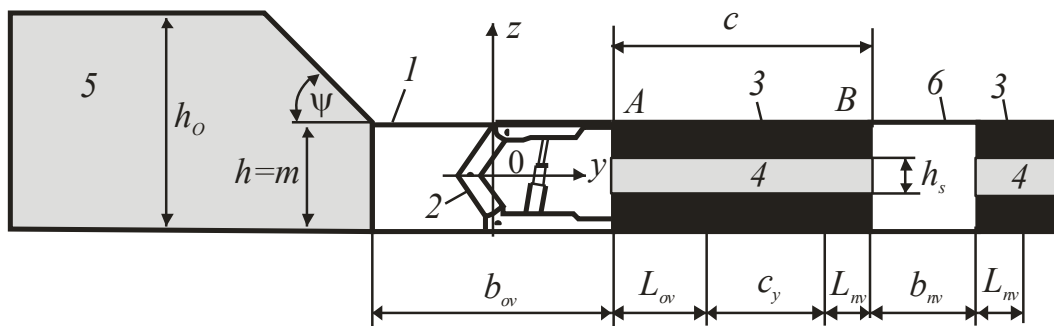


Рис. 1. Расчётная схема массива

Основными параметрами задачи являются характеристики прочности пласта: σ_0 — предел прочности на одноосное сжатие. Коэффициент сцепления K и угол внутреннего трения ρ пласта меньше, чем характеристики прочности пород вмещающего массива, но больше, чем характеристики (K' — коэффициент сцепления, ρ' — угол внутреннего трения) по контактам пласта с остальным массивом. Мощность низко прочного прослойка угля («слабого» пачки), расположенного в центральной части пласта равна h_s . Предел прочности прослойка σ_{os} значительно ниже, чем σ_0 , а угол внутреннего трения ρ_s близок к значению ρ . В краевых частях пласта образуются зоны неупругого деформирования. В борту очистной выработки ширина зоны L_{ov} , а в борту подготовительной выработки она составляет L_{nv} . Из рис. 1 следует, что в целике есть упругая область (упругое ядро) шириной $c_y = c - (L_{ov} + L_{nv})$. Слой обрушенных пород принят сыпучей средой и его параметрами является угол внутреннего трения ρ_{on} и коэффициент разрыхления k_p .

Система координат yOz совпадает с центральными осями выработки.

По условиям задачи необходимо определить параметры опорного давления в приконтурных зонах выработок, допускаемую, предельную нагрузку на целик и вычислить коэффициент запаса прочности угольного целика.

Механизм формирования предельно напряжённых зон в структурно однородном пласте (в отсутствии кливажа) с образованием линий скольжения изложен в работах [3, 12]. В них показано, что предельно напряжённые зоны структурно однородного пласта развиваются вглубь, начиная с его обнажения (от его кромки), когда вертикальные главные напряжения σ_1 (главное напряжение σ_3 на обнажении равно нулю) достигают значения σ_0 . В предельно напряжённой зоне пласт деформируется не только по направлению его мощности, но и вдоль контакта с окружающими породами, где происходит его проскальзывание. В этой связи в нём одновременно реализуются два предельных состояния равно-

весия: общее или обыкновенное (состояние самого пласта) и специальное (состояние по контакту пласта с окружающим массивом) [3, 13]. Эти два условия соответствуют критериям Кулона – Мора для прямолинейных огибающих кругов предельных состояний по пласту и по контакту пласта (слоя) с массивом.

Критерии Кулона – Мора совместно с дифференциальными уравнениями равновесия образуют систему уравнений о напряжённом состоянии краевой зоны угольного пласта. В плоской задаче, к которой относится и поставленная здесь задача, система уравнений сводится к системе двух нелинейных дифференциальных уравнений. Уравнения такого типа решаются методом характеристик. Характеристики или характеристические линии совпадают с линиями скольжения материала [3, 13]. На характеристиках уравнения упрощаются, но, тем не менее, на большинстве участков предельно напряжённой зоны решение можно получить только путём вычислительной процедуры [12, 13].

Очевидно, что при наличии в угольном пласте прослойка предельное состояние наступает сначала в нём, а с удалением от кромки пласта по мере роста в прослойке напряжений в предельное состояние переходит и сам пласт, и после этого он и прослойка деформируются как единое целое. Поэтому в борту очистной выработки суммарная ширина зоны L_{ov} , а в борту подготовительной выработки она составляет L_{nv} .

Следует отметить, что характер распределения эпюр напряжений вдоль контактов прослойка, пласта и массива, а также вдоль оси пласта представляет вид попеременно сменяющихся постоянных и нелинейных участков [3, 12]. При решении упругопластической задачи о пластовой выработке в углепородном массиве, ступенчато меняющиеся эпюры напряжений аппроксимируются монотонными функциями в виде полиномов, степень которых определяется протяжённостью предельно напряжённой зоны [6–12].

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 [14, 15].

Входящие в уравнения неизвестные находятся в ходе реализации итерационной процедуры метода последовательных приближений [6]. Эпюра вертикальных нормальных напряжений, построенная в ходе стыковки решения упругой и пластической областей, 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И ИХ АНАЛИЗ

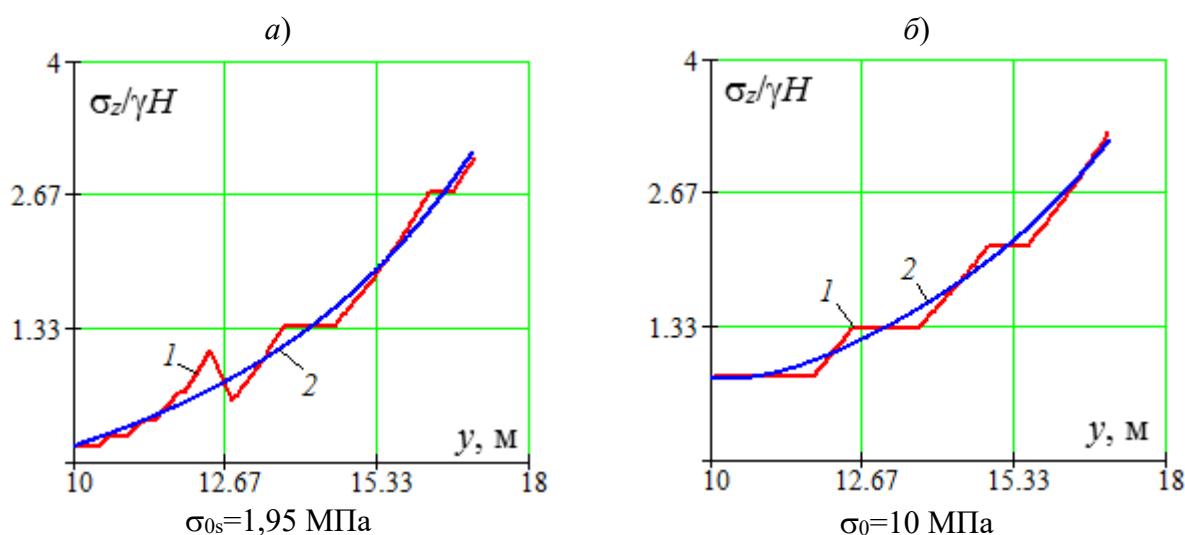


Рис. 2. Эпюры нормального напряжения σ_z в предельно напряжённой зоне кровли пласта

На рис. 3–5 приведены результаты решения упругопластической задачи о напряжённом состоянии массива, вмещающем очистную и подготовительную выработки. В частности, построена эпюра опорного давления на угольный целик, представляющая собой эпюру распределения нормального напряжения σ_z вдоль кровли пласта (вдоль прямой АВ на рис. 1). Здесь цифрой 1 обозначены участки эпюры напряжений в предельно напряжённой зоне, а цифрой 2 — в упругой области.

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, $\psi = 50^\circ$, $\sigma_0 = 10$ МПа, $\rho = 20^\circ$, $\sigma_{0s} = 1,95$ МПа, $\rho_s = 20^\circ$, $\rho' = 10^\circ$, $K' = 0$, $\rho' = 10^\circ$, $\rho_{on} = 30^\circ$, $k_p = 1,2$; $b_{ov} = 20$ м, $b_{mv} = 5$ м, $h = m = 3$ м, $h_s = 0,75$ м, $c = 22$ м (ширина целика принята близкой по значению пролёту очистной выработки). Длина очистного забоя L (длина лавы) равна 200 м.

На рис. 2 приведены эпюры нормального напряжения σ_z вдоль кровли пласта в его предельно напряжённой зоне шириной 7 м. Цифрой 1 обозначены ступенчато изменяющиеся эпюры, построенные методом характеристик, цифра 2 обозначает полиномы пятой степени, аппроксимирующие эпюры 1. На рис. 2а эпюры построены при наличии прослойка, а на рис. 2б в структурно однородном пласте.

На рис. 3 построена эпюра напряжений σ_z в пласте с прослойком ($\sigma_{0s} = 1,95$ МПа). По результатам расчётов параметры опорного давления принимают следующие значения: в окрестности очистной выработки максимальное напряжение σ_z получилось равным $3,035 \gamma H$ и оказалось в области упругого деформирования целика, а $L_{ov} = 6,7$ м; в окрестности подготовительной выработки максимальное напряжение $\sigma_z = 2,454 \gamma H$ и находится на границе упругой области целика и его предельно напряжённой зоны, размер который

равен $L_{nv} = 6,34$ м. Ширина упругой области целина $s_{ув}$ равна 8,96 м.

На рис. 4 построена эпюра напряжений σ_z в однородном пласте без прослойка ($\sigma_0 = 10$ МПа). Результаты расчётов параметров опорного давления показаны на рисунке.

Сравнение результатов на рис. 3, 4 показывает, что наличие прослойка приводит к увеличению параметров опорного давления в целике и, следовательно, к уменьшению размера упругого ядра целика.

На рис. 5 показана эпюра напряжений σ_z в пласте с прослойком ($\sigma_{0s} = 1,95$ МПа), по-

строенная на основании подхода о средне-взвешенной прочности пласта. В этом случае предел прочности σ_c равномерно «размазан» по мощности пласта и вычисляется по формуле [3]

$$\sigma_c = \frac{\sigma_0 \cdot (h - h_s) + \sigma_{0s} \cdot h_s}{h},$$

при исходных данных:

$$\sigma_c = \frac{10 \cdot (3 - 0.75) + 1.95 \cdot 0.75}{3} = 8.0 \text{ МПа}.$$

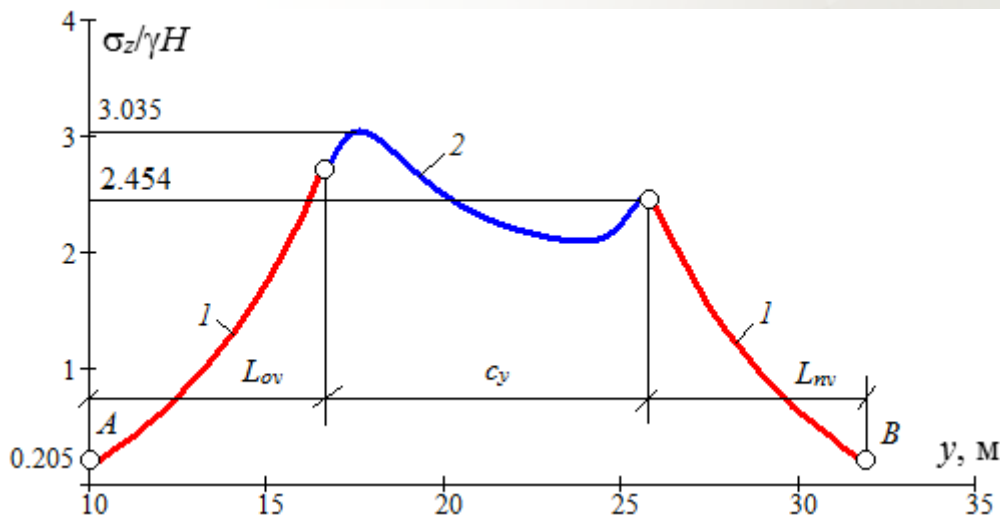


Рис. 3. Эпюра напряжений σ_z в кровле пласта с прослойком

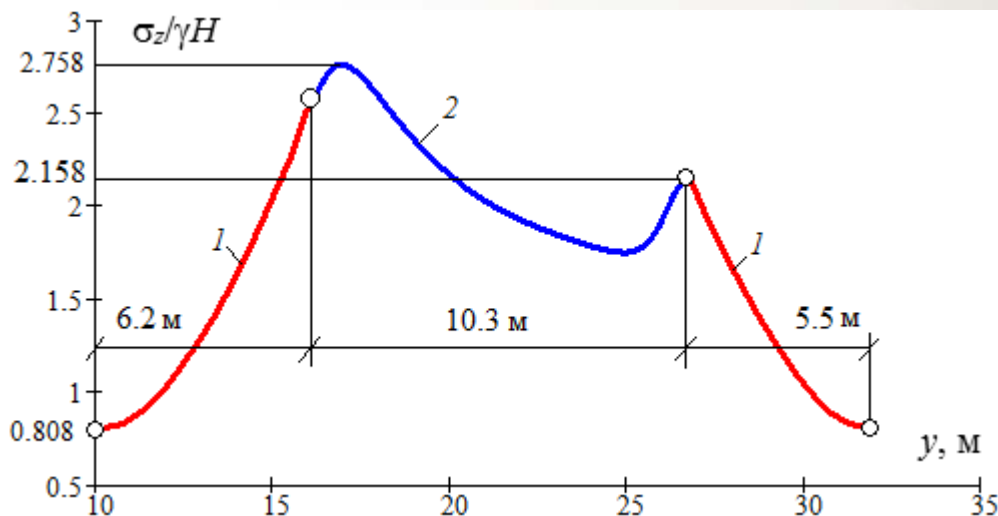


Рис. 4. Эпюра напряжений σ_z в кровле однородного пласта (без прослойка)

Из сравнения результатов, полученных с помощью двух подходов, следует, что силовые параметры опорного давления (величины максимальных нормальных напряжений), вычисленные по подходу о средневзвешенной прочности пласта меньше, а деформационные (размеры предельно напряжённых зон) больше аналогичных параметров, полученных согласно подходу о раздельном учёте сначала прочности прослойка, а затем прочности самого пласта.

При расчёте прочности угольных целиков важнейшими параметрами являются следующие показатели: действующая нагрузка на угольный целик и коэффициент запаса прочности целика.

В зависимости от отношения длины лавы (длины очистной выработки) к глубине ведения очистных работ (L/H) нагрузку на целик определяют либо на основе подхода акад. Л.Д. Шевякова (при $L/H \geq 1$), либо на основе подхода проф. К.В. Руппенейта (при $L/H < 1$) [1, 16].

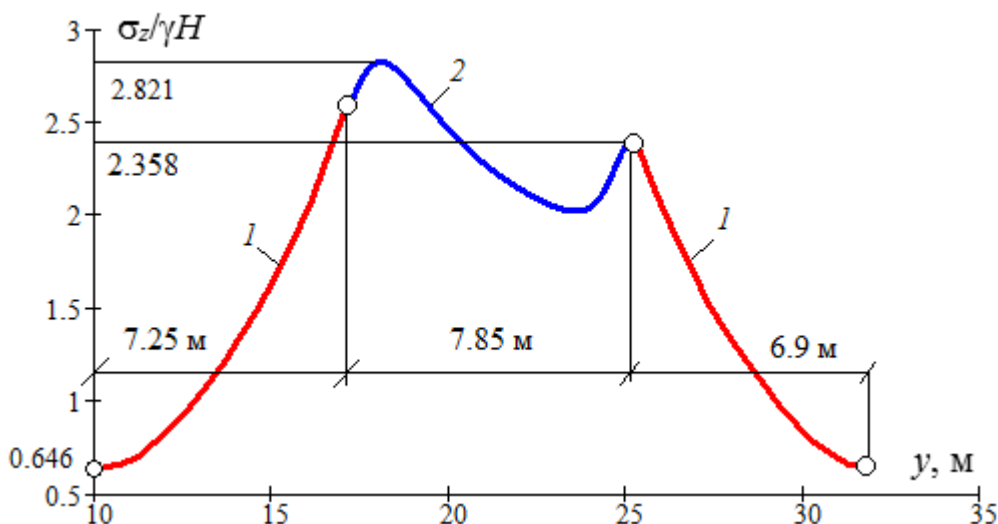


Рис. 5. Эпюра напряжений σ_z в кровле пласта со средневзвешенной прочностью

Нагрузка на целик по Л.Д. Шевякову численно равна весу столба налегающих пород на единицу его длины и определяется по формуле

$$P_{Sh} = \gamma H \left(\frac{b_{ov} + b_{nv}}{2} + c \right). \quad (1)$$

Нагрузка на целик на основе проф. К.В. Руппенейта определяется с помощью эпюры опорного давления, полученной методами механики деформируемого твёрдого тела, и находится путём интегрирования эпюры опорного давления:

$$P_R = \int_{y_A}^{y_B} \sigma_z(y) dy = \int_0^{L_{ov}} \sigma_z(y) dy + \int_0^{L_{nv}} \sigma_z(y) dy + \int_{L_{ov}+c_y}^{L_{ov}} \sigma_z(y) dy. \quad (2)$$

Поскольку при данных условиях $L/H = 1/3 < 1$, то формула акад. Шевякова не годится. Поэтому для определения нагрузки на целик следует воспользоваться подходом проф. Руппенейта и зависимостью (2), в которой функция напряжения σ_z , определена методами теории упругости и механики предельного равновесия (сыпучей среды), являющимися разделами механики деформируемого тела.

Первый и второй интегралы в выражении (2) вычисляются в замкнутом виде, поскольку интегрирование ведётся на участках предельно напряжённой зоны, где напряжения аппроксимированы полиномами пятой степени. Третий интеграл в выражении (2) берётся численно (методом трапеций), поскольку в упругой области значения напряжения σ_z определяются путём численного решения граничного интегрального уравнения теории упругости.

Коэффициент запаса прочности целика определяется отношением предельной нагрузки, называемой его несущей способностью, к действующей нагрузке на целик. Предельная нагрузка соответствует состоянию целика, при котором он полностью переходит в предельное состояние. Очевидно, что в таком состоянии предельно напряжённые зоны в бортах каждой выработки одинаковы.

На рис. 6 показана эпюра напряжения σ_z , соответствующая предельному состоянию целика. Она построена путём продления кривых 1 (рис. 4) до их пересечения в точке С, которая расположена над серединой целика. В этом случае эпюра напряжений между точками А, В, С симметрична относительно вертикали, проходящей через точку С.

Следовательно, для определения предельной нагрузки достаточно проинтегрировать в пределах половины ширины целика эпюру напряжения σ_z , соответствующую предельно напряжённой зоне и умножить её на два.

В этой связи предельная нагрузка определяется следующим образом:

$$P_p = 2 \int_0^{c/2} \sigma_z(y) dy, \quad (3)$$

а коэффициент запаса прочности n определяется отношением нагрузок P_p к P_R

$$n = \frac{P_p}{P_R}. \quad (4)$$

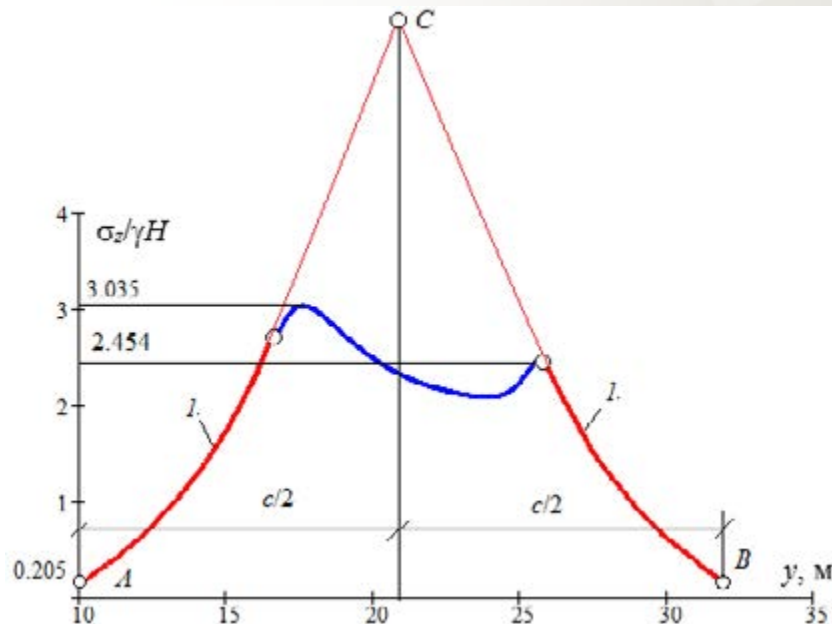


Рис. 6. Эпюра напряжений σ_z в кровле пласта, находящегося в предельном состоянии

По формулам (1) – (4) проведены расчёты, получены величины нагрузок на целик и вычислены значения коэффициента его запаса прочности для трёх отмеченных выше примеров.

Пример 1. В угольном целике содержится прослойка. Действующая нагрузка $P_R = 550,6$ МН/м, предельная (разрушающая) нагрузка $P_p = 915,06$ МН/м, коэффициент запаса прочности $n = 915,06/550,6 = 1,66$.

Пример 2. Угольный целик не содержит прослойка. Действующая нагрузка

$P_R = 578,71$ МН/м, предельная нагрузка $P_p = 962,85$ МН/м, коэффициент запаса прочности $n = 962,85/578,71 = 1,68$.

Пример 3. В угольном целике содержится прослойка, и его характеристики прочности определяются как средневзвешенные по мощности пласта. Действующая нагрузка $P_R = 555,29$ МН/м, предельная нагрузка $P_p = 769,41$ МН/м, коэффициент запаса прочности $n = 769,41/555,29 = 1,39$.

Из сравнительных оценок полученных результатов, как и следовало ожидать, наи-

больший коэффициент запаса прочности получен для целика структурно однородного пласта.

Величина коэффициента запаса прочности, полученного в соответствии с подходом о последовательном переходе в предельное состояние сначала прослойка, а затем и самого пласта, незначительно отличается от величины коэффициента запаса прочности для целика структурно однородного пласта.

Значение коэффициента запаса прочности в целике с непрочным прослойком, полученное согласно подходу (гипотезе) о средне-взвешенной по мощности пласта прочности, оказывается существенно ниже значений коэффициентов запаса прочности целика, подсчитанных в двух предыдущих примерах, и отличается от них порядка 16,5 %.

ВЫВОДЫ

1. Задача о напряжённом состоянии массива в окрестности очистной и подготовительной выработок, фактических и предельных нагрузках на целик как однородного угольного пласта, так и пласта, содержащем непрочный прослойк, относится к классу упругопластических задач. Она решается методами теории упругости и механики сыпучей среды.

2 Фактическая нагрузка на целик определяется интегрированием эпюры вертикального нормального напряжения, действующего в кровле пласта.

3. Разрушающая нагрузка получена путём интегрирования в пределах всей ширины угольного целика вертикального нормального напряжения, соответствующего предельно напряжённому состоянию пласта, которое оценивается фундаментальными методами механики сыпучей среды.

4. Значения коэффициента запаса прочности целика структурно однородного пласта и коэффициента запаса прочности целика с непрочным прослойком, вычисленным согласно подходу о последовательном переходе в предельное состояние сначала прослойка, а потом и самого пласта, незначительно отличаются друг от друга.

5. Величина коэффициента запаса прочности угольного целика с прослойком, вычисленным в соответствии с подходом о средне-взвешенной по мощности пласта прочностью, более, чем на 16 % меньше аналогичного коэффициента запаса прочности, вычисленного согласно отдельному переходу в предельное состояние прослойка и пласта.

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., Сидоров В.С., Фельдман И.А. Теория защитных пластов. М.: Недра, 1976. 223 с.
5. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. Л.: Недра, 1989. 488 с.
6. 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.
7. Черданцев Н.В. Оценка геомеханического состояния краевой зоны угольного пласта, вмещающего непрочный прослойк // Прикладная математика и механика. 2021. № 2. С. 239–256.
8. Черданцев Н.В. К расчёту угольных целиков между пластовыми выработками // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 1. С. 26–30.

9. Cherdantsev N.V. Some approaches to coal pillar strength calculation // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 3. С. 31–38.
10. Черданцев Н.В. Исследование состояния угольного целика между очистной и подготовительной выработками методами механики деформируемого тела // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 12. С. 26–31.
11. Черданцев Н.В. Построение решения задачи о напряжённом состоянии отрабатываемого угольного пласта около двух выработок // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2020. № 4. С. 87–100.
12. 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.
13. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
14. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
15. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. М.: Наука, 1981. 688 с.
16. Макаров А.Б. Практическая геомеханика. Пособие для горных инженеров М.: Горная книга, 2006. 391 с.

DOI: [10.25558/VOSTNII.2023.60.59.001](https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2023.60.59.001)

UDC 622.023.23

© N.V. Cherdantsev, 2023

N.V. CHERDANTSEV

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: nvch2014@yandex.ru

ON ONE THEORETICAL APPROACH TO CALCULATING THE STRENGTH OF A COAL PILLAR WITH A WEAK LAYER

Within the framework of the previously developed model of the geomechanical state of an anisotropic rock mass with respect to strength, containing formation workings, studies were carried out on the stress state of a coal pillar containing a «weak» interlayer. The pillar is located between the treatment pit approaching the panel preparation pit.

The model is based on a number of fundamental methods of mechanics of a deformable solid. To construct the stress field in the host mass, the method of boundary integral equations is used, and the stress state of the marginal zone of the formation, which is in an extremely stressed state and experiences inelastic deformation, is determined by the method of characteristics. The length of the maximum stress zone and the maximum stresses at the junction of it with the elastic region of the formation (maximum reference pressure) are found by the method of successive approximations.

Comparative estimates of the parameters of the reference pressure in the coal seal of a structurally homogeneous formation (without an interlayer) and in the presence of a weak interlayer are given. It has been shown that the content of the «weak» interlayer increases the parameters of the marginal extremely stressed zone of the formation (the length of the zone and the maximum reference pressure) compared to similar parameters in a structurally homogeneous formation.

Keywords: ROCK MASSIF, COAL SEAM, WEAK INTERLAYERS, CLEANING AND PREPARATION WORKINGS, EXTREME STRESS ZONES, STRENGTH CHARACTERISTICS, SLIDING LINES, PENDANT STRENGTH CRITERION – MORA

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., Sidorov V.S., Feldman I.A. Theory of Protective Layers. M.: Nedra, 1976. 223 p. [In Russ.].
5. Turchaninov I.A., Iofis M.A., Kasparyan E.V. Fundamentals of rock mechanics. Leningrad: Nedra, 1989. 488 p. [In Russ.].
6. 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.].
7. Cherdantsev N.V. Assessment of the geomechanical state of the marginal zone of a coal seam containing a fragile interlayer // Applied Mathematics and Mechanics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 2021. No. 2. P. 239–256. [In Russ.].
8. Cherdantsev N.V. To the calculation of coal pillars between in-seam workings // Labor safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2020. No. 1. P. 26–30. [In Russ.].
9. Cherdantsev N.V. Some approaches to coal pillar strength calculation // News of universities. Mining Journal [Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal]. 2020. No. 3. P. 31–38. [In Russ.].
10. Cherdantsev N.V. Studies of the stress state of the coal pillar between the treatment and preparatory workings by the methods of deform-able body mechanics // Labor safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2020. No. 12. P. 26–31. [In Russ.].
11. Cherdantsev N.V. Construction of a solution to the problem of the stressed state of the developed coal seam near two workings // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoi i ekologicheskoi bezopasnosti]. 2020. No. 4. P. 87–100. [In Russ.].
12. Cherdantsev N.V. Investigation of the extremely stressed state of the formation in its boundary zone by methods of bulk medium mechanics // Mining information and analytical bulletin [Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten]. 2020. No. 3. P. 43–57. [In Russ.].
13. Sokolovsky V.V. Loose Medium Statics. M.: Nauka, 1990. 272 p. [In Russ.].
14. Lurie A.I. Theory of Elasticity. M.: Nauka, 1970. 940 p. [In Russ.].
15. Parton V.Z., Perlin P.I. Methods of Mathematical Theory of Elasticity. M.: Nauka, 1981. 688 p. [In Russ.].
16. Makarov A.B. Practical rock mechanics. Manual for mining engineers M.: Publishing house «Gornaya kniga», 2006. 391 p. [In Russ.].