

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.33.32.001

УДК 622.023.23

© Н.В. Черданцев, 2021

**Н.В. ЧЕРДАНЦЕВ**

д-р техн. наук,

главный научный сотрудник

ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово

e-mail: nvch2014@yandex.ru



## ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РАСЧЁТУ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ КРАЕВОЙ ЗОНЫ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА, ВМЕЩАЮЩЕГО НЕПРОЧНЫЙ ПРОСЛОЕК

*На базе основных положений и подходов механики деформируемого твёрдого тела разработана модель напряжённого состояния краевой зоны угольного пласта, вмещающего «слабый» прослойк. В этой модели предельно напряжённое состояние начинается в прослойке, а затем на некотором расстоянии от кромки пласта оно распространяется и на всю мощность пласта, включая и прослойк. Части пласта, примыкающие непосредственно к его кромке и расположенные сверху и снизу от прослойка, остаются в упругом состоянии.*

*Поле напряжений в предельно напряжённой зоне пласта определяется методом характеристик, а в упругой области оно строится методом граничных элементов. Переход пласта в предельно напряжённое состояние оценивается критериями Кулона – Мора. В рамках модели проведён вычислительный эксперимент для ряда горно-геологических условий угленосного массива.*

*На основе анализа полученных результатов выявлен ряд особенностей в распределении напряжений в краевой части пласта. Показано, что наличие «слабого» прослойка при некотором значении его мощности уменьшает размер предельно напряжённой зоны, но увеличивает максимум опорного давления по сравнению с аналогичными параметрами в структурно однородном пласте.*

**Ключевые слова:** МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ПЛАСТОВАЯ ВЫРАБОТКА, ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫЕ ЗОНЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ, ЛИНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ, КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ, КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ КУЛОНА – МОРА.

### ВВЕДЕНИЕ

Задача расчёта напряжённо деформированного состояния массива горных пород, вмещающего угольный пласт и пройденную по нему выработку, является важной и актуальной научной проблемой [1–8]. Предельно напряжённые зоны, образующиеся в краевых частях пласта, существенно влияют на распределение поля напряжений и в угольном

пласте, и в породах массива, окружающих горную выработку [1, 5, 9, 10]. При определённых сочетаниях его компонентов оно может быть причиной ряда геодинамических явлений: горных ударов, обильного газовыделения в выработки, внезапных выбросов горной массы из забоев выработок, пучения почвы и значительных смещений их кровли [2–8, 11–16], которые оказывают пагубное влияние на горные работы [3, 6, 8, 11].

Несмотря на то, что эти явления на угольных шахтах происходят довольно часто, существующие методы прогноза и борьбы с ними не всегда эффективны [2, 3, 5, 6, 11] в первую очередь из-за недостаточной изученности проблемы о напряжённом состоянии краевой зоны пласта.

Современные понятия и представления о горных ударах и внезапных выбросах основаны на предположениях о том, что в большинстве случаев они происходят в предельно напряжённых краевых зонах угольных пластов. Следует отметить, что все существующие теории едины в том, что для описания этих явлений необходимо знать характер распределения поля напряжений в краевых предельно напряжённых зонах пласта. В этой связи задача о геомеханическом состоянии пласта обычно сводится к определению параметров опорного давления, к которым относится эпюра вертикальной нормальной компоненты тензора напряжений и размер зоны неупругих деформаций (предельно напряжённой зоны). Эти параметры могут быть определены экспериментально непосредственно в области ведения горных работ [3–5, 8], а также теоретически в рамках ряда существующих моделей геомеханического состояния массива [1, 2, 5, 6, 9, 10].

Модели геомеханического состояния углепородного массива можно условно классифицировать на несколько типов (категорий).

1. Модели напряжённо-деформированного состояния пласта, разработанные на основе положений и методов теории упругости, где угольный пласт представляется включением, у которого упругие характеристики существенно отличаются от характеристик горных пород вмещающего массива [17].

2. Модели напряжённого состояния краевой зоны пласта, построенные на базе методов теории упругости и пластичности, в которых состояние пласта в предельной зоне следует классическим критериям пластичности Треска – Сен-Венана или Губера – Мизеса [1, 7].

3. Модели напряжённого состояния пла-

ста, разработанные на базе методов предельного состояния горных пород и сыпучих сред. В этих моделях эпюра напряжений в предельно напряжённой зоне описывается полуэмпирическими зависимостями, в которых часть параметров определяется по результатам экспериментов, проводимых в натуральных условиях [1, 5].

4. Модели напряжённого состояния пласта, разработанные на основе фундаментальных методов механики деформируемого твёрдого тела и сыпучих сред [9, 10, 18]. В этих моделях поле напряжений строится теоретически с применением метода характеристик, разработанного В.В. Соколовским [19]. Критериями предельного состояния пласта являются общий и специальный критерии Кулона – Мора.

Сравнение моделей показывает, что третий и четвёртый типы из приведённого списка наиболее близко отражают реальное состояние пласта и могут эффективно применяться к исследованию и напряжённого состояния пласта, и геомеханического состояния углепородного массива. Однако следует отметить, что результаты расчёта поля напряжений в предельно напряжённой зоне пласта, полученные в рамках этих моделей, довольно значительно отличаются друг от друга, особенно вдали от его кромки.

Сравнение экспериментального и теоретического подходов к определению параметров опорного давления показывает, что применение моделей имеет ряд преимуществ по сравнению с экспериментами. Во-первых, они менее затратные, во-вторых, позволяют установить качественные и количественные закономерности в поведении массива и, следовательно, определить некоторые прогнозные оценки о напряжённом состоянии пласта и вмещающего массива.

Зачастую угольные пласты содержат прослойки угля или горной породы с довольно низкими характеристиками прочности по сравнению с характеристиками прочности самих пластов. В таких случаях формулирование задачи и её решение связано с определёнными трудностями, обусловленными

более сложным механизмом формирования предельно напряжённых зон по сравнению с задачей со структурно однородным угольным пластом.

В моделях третьего типа влияние прослойка на напряжённое состояние угольного пласта учитывается путём предварительного вычисления средневзвешенного предела прочности пласта и прослойка и дальнейшим использованием его в полуэмпирической формуле для получения эпюры опорного давления [5]. Однако такой подход не отражает действительной картины распределения опорного давления в предельно напряжённой зоне, поскольку в расчётах учитывается тот же структурно однородный пласт, что и в отсутствии прослойка, но лишь с более низким пределом прочности пласта. В других же моделях прочностные характеристики прослойка вообще никак не учитываются.

В этой связи разработана модель напряжённого состояния краевой части пласта с прослойком, и в данной статье представлены некоторые результаты, полученные в рамках этой модели. Она основана на ранее созданной модели напряжённого состояния краевой части структурно однородного пласта, находящегося в предельном состоянии [9, 10].

Механизм формирования предельно напряжённых зон с образованием линий скольжения подробно изложен в работах [5, 9, 10]. В них показано, что предельно напряжённые зоны структурно однородного пласта развиваются вглубь пласта, начиная с его обнажения (от его кромки), на котором вертикальные главные напряжения  $\sigma_1$  (главное напряжение  $\sigma_3$  на обнажении равно нулю) достигают значения  $\sigma_0$ .

В ходе решения поставленной задачи определяются параметры опорного давления (размер предельно напряжённой зоны  $L$  и максимальная величина вертикальной компоненты нормальных напряжений  $\sigma_2$ ) для ряда значений мощности прослойка при фиксированных значениях его прочности и прочности самого пласта.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЁ РЕШЕНИЕ

Задача формулируется следующим образом. В массиве горных пород, моделируемом невесомой плоскостью, имеется выработка 1 прямоугольного поперечного сечения размерами  $b \times h$ , пройденная на глубине  $H$  по угольному пласту 2 на всю мощность (рис. 1). Характеристики прочности пласта:  $\sigma_0$  — предел прочности на одноосное сжатие,  $K$  — коэффициент сцепления,  $\rho$  — угол внутреннего трения меньше, чем характеристики прочности пород вмещающего массива, но больше, чем характеристики ( $K'$  — коэффициент сцепления,  $\rho'$  — угол внутреннего трения) по контактам пласта с остальным массивом. В центральной части пласта имеется слой (пачка, прослоек) «слабого» (низкопрочного) угля мощностью  $h_s$ . Предел прочности слоя  $\sigma_{0s}$  значительно ниже, чем  $\sigma_0$ , а угол внутреннего трения  $\rho_s$  близок к значению  $\rho$ . Массив нагружен гравитационным давлением сверху и снизу  $\gamma H$  ( $\gamma$  — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород), а с боков —  $\lambda \gamma H$  ( $\lambda$  — коэффициент бокового давления). В краевых частях пласта образуются зоны неупругого деформирования 3, 4 шириной  $L = L_s + L_p$  ( $L_s$  — ширина зоны прослойка,  $L_p$  — ширина зоны пласта), а за ними в глубине массива находится область упругого деформирования пласта 5. Система координат  $yOz$  совпадает с центральными осями выработки.

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. Далее пласт и прослоек деформируются как единое целое.

Схема характерных участков с линиями скольжения на их границах показана на рис. 1. Они имеют такой же вид, как и для структурно однородного пласта [9, 10, 18]. Для упрощения линии скольжения показаны для частей пласта и прослойка, расположенных над осью  $y$ .

Как было показано в [10], в предельно напряжённой зоне существует ряд участков с характерным распределением линий



скольжения. В некоторых из них сетка линий скольжения образована системой прямых изогональных линий, в пределах других участков одна система линий скольжения прямолинейна, другая система криволинейна, а на третьих участках обе линии скольжения криволинейны.

На рис. 1 участками с прямолинейными границами являются участки  $a, d, o, r, w$ . К участкам с криволинейными границами относятся участки  $e, s, q, v$ . Участки  $c, k, p, f$

образованы системами прямых и кривых линий скольжения.

Зная характер распределения линий скольжения, нетрудно установить и характер распределения напряжений в пределах каждого участка. Например, вдоль горизонтальных сторон участков  $a, d, o, r, w$  напряжения постоянны, а вдоль горизонтальных сторон участков  $e, s, q, v$  напряжения возрастают нелинейно.

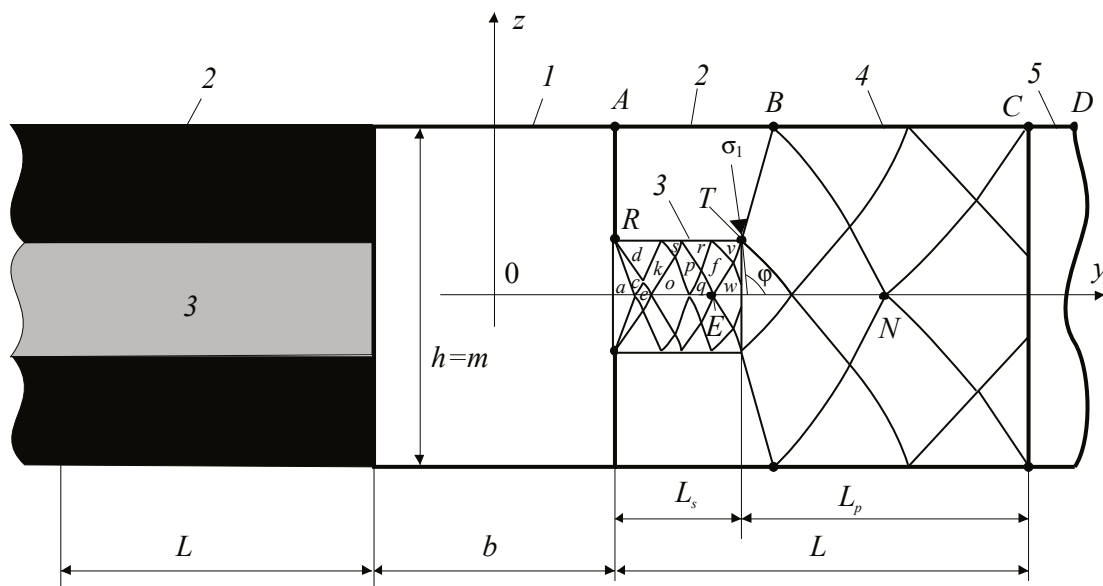


Рис. 1. Расчётная схема задачи

Таким образом, напряжения вдоль контакта прослойка, как и вдоль его оси эпюры нормальных напряжений, представляют собой графики в виде сменяющих друг друга участков с постоянными и нелинейно возрастающими линиями [18].

Из рис. 1 следует, что предельное состояние в пласте возникает лишь на некотором удалении от его кромки и при достижении приведённым напряжением [9, 10, 18] в прослойке величины приведённого напряжения в пласте, соответствующего его пределу прочности при одноосном напряжённом состоянии. Из соображений непрерывности приведённых напряжений и отсутствия разрывов в линиях скольжения в пласте и слое условия перехода пласта в предельное состояние принимает следующий вид:

$$\sigma_p = \sigma_s, \quad \varphi_p = \varphi_s,$$

где  $\sigma_p$  — приведённое напряжение в пласте, соответствующее его пределу прочности,  $\sigma_s$  — приведённое напряжение в прослойке,  $\varphi_p$  — угол наклона к горизонту напряжения  $\sigma_1$  в пласте,  $\varphi_s$  — угол наклона  $\sigma_1$  в прослойке в точке T, расположенной на расстоянии  $L_p$  от обнажения пласта,  $\sigma_s$  определяемое по формуле.

Очевидно, что часть пласта над прослойком и под ним находится в упругом состоянии (рис. 1). Из условия их равновесия, например, части пласта над прослойком, следует, что касательная нагрузка, действующая вдоль линии AB, противоположна касательной нагрузке вдоль линии RT.

После перехода пласта в предельное состояние с образованием линии скольжения TB дальнейшее развитие его предельно напряжённой зоны происходит совместно с

прослойком. Поскольку на этой линии приведённое напряжение соответствует одноосному сжатию, то она является прямой линией. Во всех её точках координаты, а также приведённое напряжение и угол  $\varphi$  определяются решениями краевой задачи для участка прослойка. Таким образом, вдоль линии скольжения *ЕТВ* граничные условия известны. Далее решается третья краевая задача предельного состояния для участка пласта *ЕВН*, а затем третья краевая задача решается для участка *ВНС* [9, 10, 18].

В кровле пласта эпюры напряжений также имеют вид ступенчато нелинейных графиков. В дальнейших исследованиях напряжённого состояния массива горных пород эти графики следует аппроксимировать аналитическими зависимостями, например, полиномами различной степени. Такая замена упрощает решение упругопластической задачи. Коэффициенты полинома определяются из решения системы алгебраических уравнений, число которых совпадает с количеством выбранных участков в предельно напряжённой зоне слоя (пласта). Правые части уравнений этой системы равны значениям найденных напряжений на границах этих участков [18].

Поставленная в статье задача о напряжённом состоянии массива горных пород, вмещающего угольный пласт с низко прочным прослойком, также, как и задача с однородным пластом, относится к классу упругопластических задач, и она вполне корректно сводится ко второй внешней краевой задаче теории упругости.

Модель напряжённого состояния структурно однородного угольного пласта такого класса задач подробно изложена в работах [9, 10]. Построение же моделей краевых задач теории упругости и их применение к оценке геомеханического состояния массивов горных пород с прочностной анизотропией подробно изложено в работе [20]. Полученные в рамках упругой модели результаты решения ряда конкретных задач для оценки и анализа состояния нарушенности и устойчивости анизотропного массива, вмещающего выработку, изложены в работах [21–27].

Такой подход к решению задачи о напряжённом состоянии пласта с низкопрочным прослойком, по-видимому, ранее в публикациях никем не представлялся.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И ИХ АНАЛИЗ

В рамках рассматриваемой модели проведён вычислительный эксперимент, за исходные данные в котором приняты следующие параметры массива, выработки и пласта:  $H = 800$  м,  $\lambda = 1$ ,  $\gamma = 25$  кН/м<sup>3</sup>,  $\sigma_0 = 10$  МПа,  $\rho = 20^\circ$ ,  $\sigma_{0s} = 2$  МПа,  $\rho_s = 20^\circ$ ,  $\rho' = 10^\circ$ ,  $K' = 0$ ,  $\rho' = 10^\circ$ ,  $b = 5$  м,  $h = 3$  м. Другие параметры в ходе вычислений менялись.

На рис. 2 представлена компьютерная модель сетки линий скольжения в предельно напряжённой зоне для верхней части угольного пласта, вмещающего низкопрочный прослойок. В качестве дополнительных исходных данных принято  $h_s = 1,0$  м.

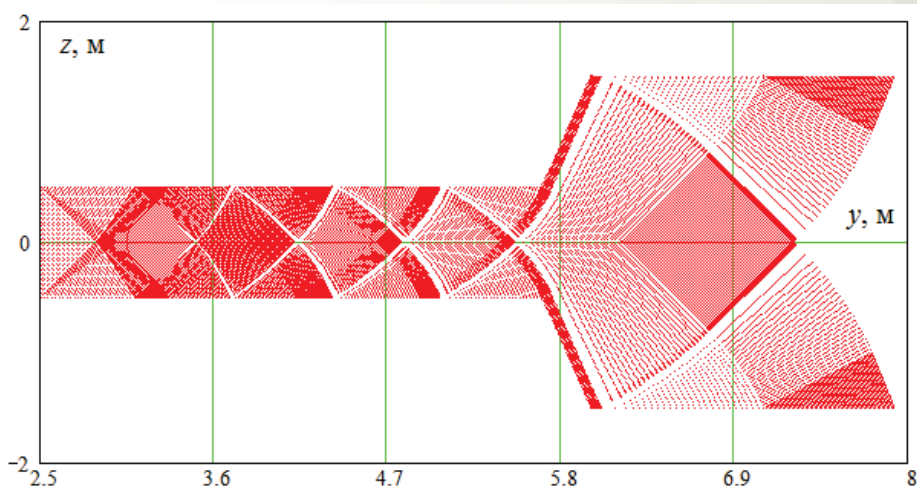


Рис. 2. Компьютерная модель сетки линий скольжения в прослойке и пласте

Сетка построена по результатам численного решения трёх краевых задач механики сыпучих сред для двенадцати характерных участков прослойка, соответствующих наступлению предельного состояния пласта, и двух участков для самого пласта. На рисунке показаны узлы сетки линий скольжения. На нём отчётливо просматривается характерное распределение линий скольжения на каждом участке.

На рис. 3 построен график (эпюра) распределения вертикального напряжения  $\sigma_z$  вдоль кровли прослойка и пласта для двадцати характерных участков предельно напряжённой зоны. Из них двенадцать участков принадлежат прослойку ( $h_s = 1,0$  м) и восемь — непосредственно пласту. На графике показаны

две крайние точки  $R$  и  $T$  участка графика, соответствующего прослойку (рис. 1). Правее точки  $T$  часть графика соответствует пласту вместе с прослойком. Из рисунка видно, что график на обоих участках, как это отмечено ранее, имеет вид попеременно сменяющихся горизонтальных и нелинейно возрастающих участков. Из графика следует, что размер предельно напряжённой зоны прослойка, при котором пласт переходит в предельное состояние, равен 3,2 м ( $5,7 \text{ м} - b/2$ ), а величина вертикального напряжения при этом составляет  $0,862 \gamma H$ . Длина участка краевой предельно напряжённой зоны пласта при двадцати участках равна 11,9 м ( $14,4 \text{ м} - b/2$ ), а приведённое напряжение достигает значения  $6,567 \gamma H$ .

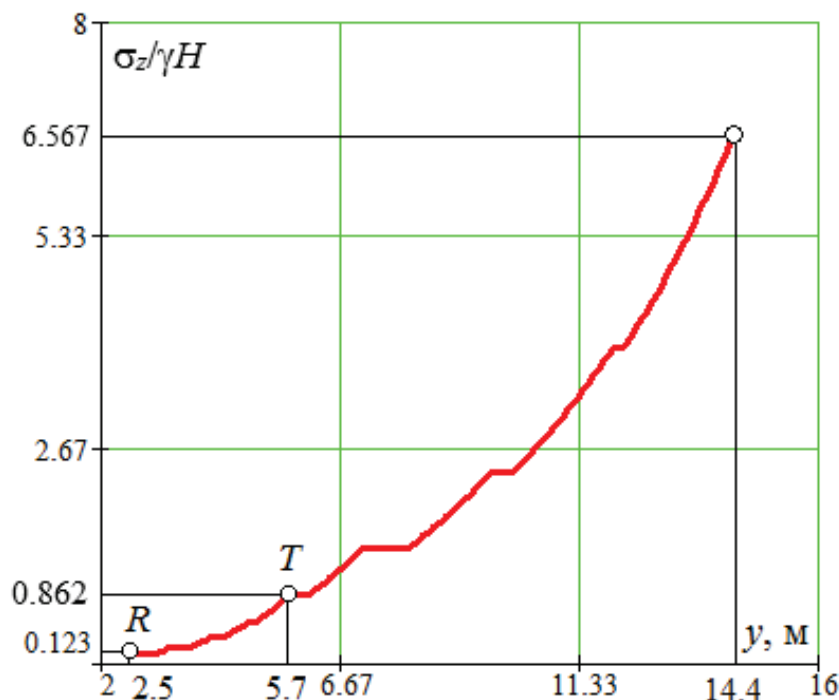


Рис. 3. Эпюра вертикальных напряжений в кровле пласта

При решении упругопластической задачи эпюры напряжений  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{yz}$ , как уже отмечено выше, аппроксимированы аналитическими функциями.

На рис. 4 построены два графика зависимости напряжения  $\sigma_z$  от координаты  $u$ . График 1 — эпюра исходного напряжения, показанного на рис. 3, а график 2 — аппроксимирующий график 1 полином пятой степени. Узловыми точками при определении

коэффициентов полинома приняты границы горизонтальных и нелинейных участков на исходной эпюре напряжений. Из рисунка 4 следует, что графики 1 и 2 практически совпадают.

На рис. 5 представлены результаты решения упругопластической задачи в виде графика нормальных напряжений  $\sigma_z$ , построенного вдоль кровли пласта (вдоль линии  $AD$  на рис. 1). Кривая 1 — эпюра напряжений в

предельно напряжённой зоне пласта, а кривая 2 — эпюра напряжений в его упругой области. Их значения совпадают в точке С, соответствующей границе упругой и предельно напряжённой зон.

Из рисунка следует, что максимальное нормальное напряжение  $\sigma_{z,max}$  в краевой части пласта, являющееся одним из параметров

опорного давления в окрестности выработки, действует на границе предельно напряжённой зоны и упругой области пласта. Оно равно 1,664  $\gamma H$ . Другой параметр опорного давления — ширина предельно напряжённой зоны  $L$  — из графика равен 5,5 м ( $8 м - b/2$ ). Для сравнения максимум опорного давления  $\sigma_{z,max}$  в пласте без прослойка равен 1,582  $\gamma H$ , а ши-

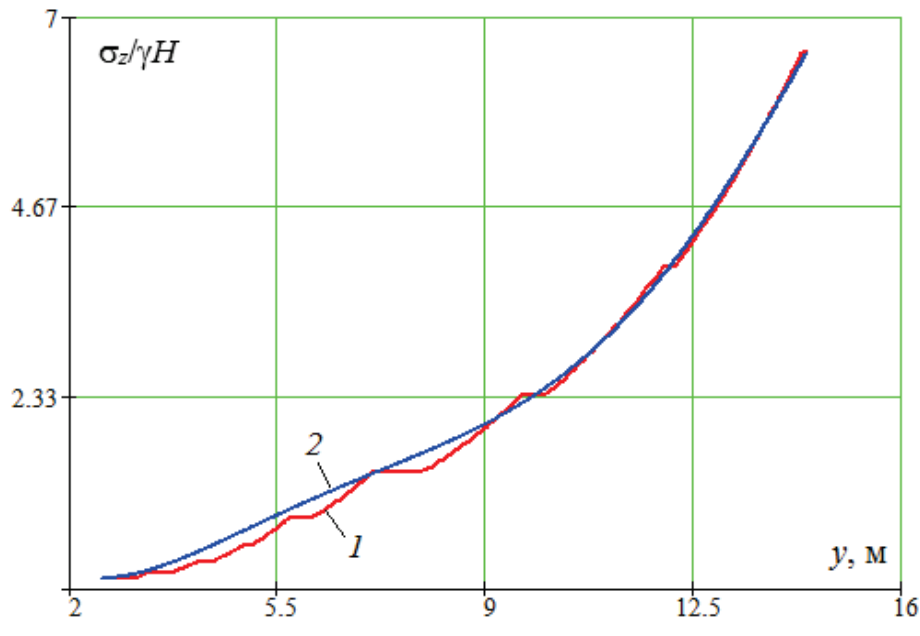


Рис. 4. Аппроксимация эпюры напряжений полиномом шестой степени

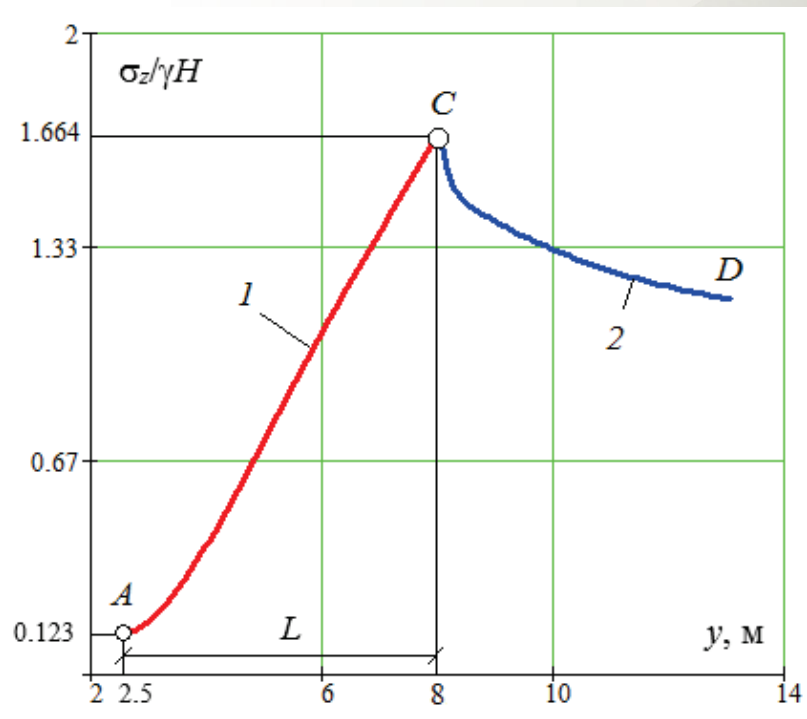


Рис. 5. Эпюра напряжений  $\sigma_z$  вдоль кровли пласта

рина зоны  $L = 4,9$  м [9].

На рис. 6, 7 показаны результаты решения упруго пластической задачи о напряжённом состоянии массива в окрестности пластовой выработки. Они представлены в виде графиков зависимости параметров опорного давления в краевой части пласта от мощности прослойка.

На рис. 6 построен график зависимости максимального напряжения (максимума опорного давления) в краевой части пласта от мощности прослойка. График состоит из двух плавно возрастающих вогнутых кривых линий, пересекающихся в точке с абсцис-

сой  $h_s = 0,5$  м, причём правая кривая имеет минимум при  $h_s = 0,95$  м, который равен  $\sigma_{z.max} = 1,658 \gamma H$ .

На рис. 7 построен график зависимости другого параметра опорного давления — размера предельно напряжённой зоны пласта от мощности прослойка. Из рисунка следует, что график состоит из двух практически линейных ветвей, имеющих общую точку при  $h_s = 0,5$  м. Левая ветвь убывающая функция, правая – возрастающая.

Из графиков рис. 6, 7 следует, что наличие «слабого» прослойка увеличивает максимум опорного давления и изменяет размер пре-

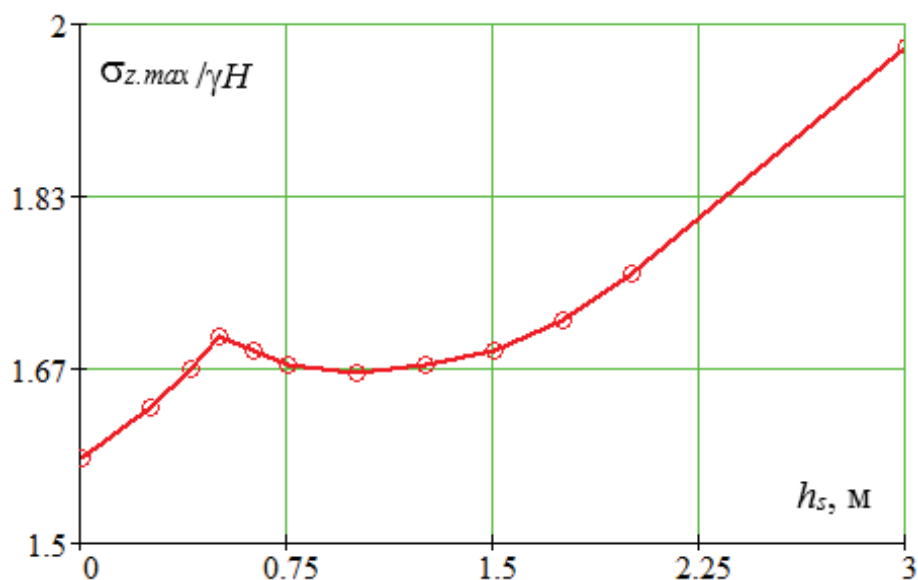


Рис. 6. График зависимости максимума опорного давления от мощности прослойка

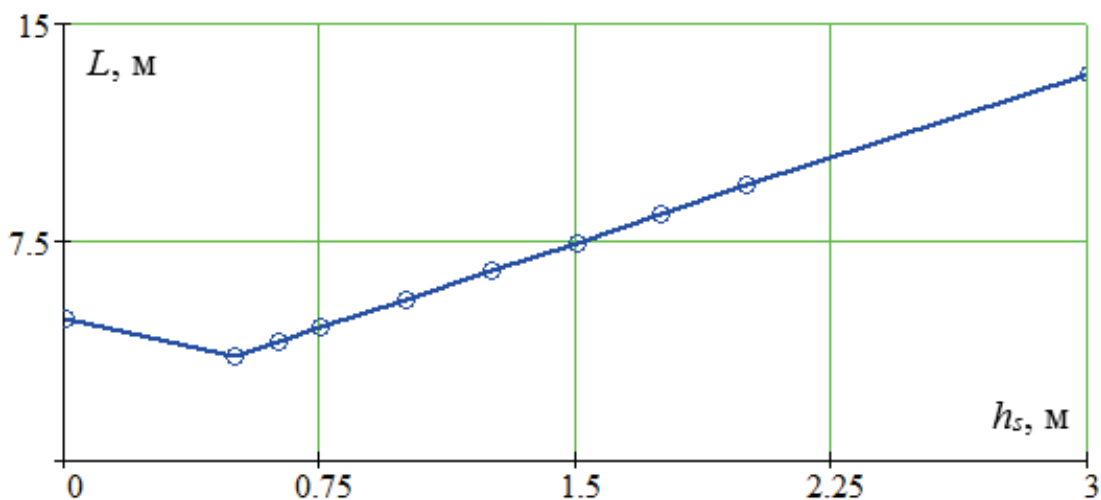


Рис. 7. График зависимости размера предельно напряжённой зоны от мощности прослойка



дельно напряжённой зоны по сравнению со структурно однородным пластом. Однако размер предельно напряжённой зоны в зависимости от мощности прослойка меняется по-разному. Так, например, при  $h_s \leq 0,95$  м он меньше, а  $h_s > 0,95$  м больше размера предельной зоны в структурно однородном пласте.

**Заключение.** Наличие в угольном пласте «слабого» прослойка приводит к появлению предельно напряжённой зоны сначала в прослойке, начиная с его кромки, а затем распространяется вглубь прослойка. При достижении напряжения в прослойке значения, соответствующего пределу прочности пласта, предельное состояние наступает и в самом пласте. Далее пласт и прослойка деформируются совместно.

## ВЫВОДЫ

1. Задача о напряжённом состоянии массива в окрестности пластовой выработки относится к классу упругопластических задач. Она корректно сводится ко второй внешней краевой задаче теории упругости, которая без проблем решается методом граничных интег-

ральных уравнений (граничных элементов).

2. Эпюра напряжений вдоль контакта прослойка с пластом, а также вдоль контакта пласта с окружающим массивом представляет собой ломаную линию в виде комбинации поочередно сменяющих друг друга горизонтальных и нелинейно возрастающих участков. Эти эпюры путём аппроксимации эпюр полиномами любой степени легко могут быть представлены плавными аналитическими функциями.

3. В пласте, имеющем прослойку, максимум опорного давления выше, а протяжённость предельно напряжённой зоны до определённой мощности прослойка меньше протяжённости предельно напряжённой зоны в структурно однородном пласте. Т. е. наличие прослойка может увеличивать максимум опорного давления, но при этом смещать его в сторону кромки пласта (борта выработки). Подобного эффекта в параметрах опорного давления пласта с прослойком в рамках известных моделей не обнаружить. Возможно, что этот эффект существенно сказывается на газодинамических проявлениях пласта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. М.: Углетехиздат, 1954. 384 с.
2. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
3. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. М.: Недра, 1979. 296 с.
4. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.
5. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
6. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С., Фельдман И.А. Теория защитных пластов. М.: Недра, 1976. 223 с.
7. Христианович С.А. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1981. 484 с.
8. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В. и др. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Новосибирск: Новосибирский писатель, 2011. 524 с.
9. 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.
10. Черданцев Н.В. Построение решения задачи о напряжённом состоянии отработываемого угольного пласта около двух выработок // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2020. № 4. С. 87–100.
11. Зыков В.С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах. Кемерово, 2010. 334 с.

12. Полевщиков Г.Я., Козырева Е.Н., Шинкевич М.В. Нелинейные изменения метанообильности высокопроизводительного выемочного участка // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 6. С. 50–54.

13. Шинкевич М.В., Козырева Е.Н., Плаксин М.С. и др. 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.

14. Козырева Е.Н. Возможности повышения эффективности управления газовыделением на выемочном участке // Вестник Научного центра ВостНИИ по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. № 3. С. 30–35.

15. Козырева Е.Н., Шинкевич М.В. Особенности газогемеханических процессов на выемочном участке шахты // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2010. № 2. С. 28–35.

16. Черданцев Н.В., Черданцев С.В., Ли Хи Ун и др. Об одном подходе к описанию суффлярных выделений газа из резервуаров угольного массива в горные выработки // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 3. С. 23–29.

17. Ермакова И.А., Пириева Н.Н. Анализ геомеханического состояния предохранительных целиков на шахте им. А.Д. Рубана // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 193–199.

18. Черданцев Н.В. Результаты численного решения уравнений предельного состояния краевой зоны пласта и их аппроксимация полиномами // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 6. С. 7–13.

19. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.

20. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Ануфриев В.Е. Вопросы методического и инструментального обеспечения мониторинга горных выработок. Кемерово, 2012. 222 с.

21. 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.

22. 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. № 57. С. 122–125.

23. 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.

24. Черданцев Н.В. Зоны нарушения сплошности в области сопряжения двух выработок квадратного поперечного сечения // Вестник КузГТУ. 2003. № 5. С. 19–21.

25. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Изаксон В.Ю. Классификация вырезов по степени их влияния на окружающий массив // Вестник КузГТУ. 2006. № 5. С. 3–7.

26. Черданцев Н.В. Влияние анкерной крепи на устойчивость породного массива, вмещающего одиночную выработку // Вестник КузГТУ. 2012. № 4. С. 3–7.

27. 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.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.33.32.001

UDC 622.023.23

© N.V. Cherdantsev, 2021

**N.V. CHERDANTSEV**

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: nvch2014@yandex.ru

### **ABOUT ONE APPROACH TO CALCULATION OF STRESSED STATE OF MARGINAL ZONE OF COAL SEAM CONTAINING FRAGILE INTERLAYER**

*On the basis of the main provisions and approaches of the mechanics of the deformable solid, a model of the stressed state of the marginal zone of the coal seam containing the «weak» interlayer was developed. In this model, the extremely stressed state begins in the interlayer, and then at a distance from the edge of the formation it extends to the entire capacity of the formation, including the interlayer. Parts of the formation adjoining directly to its edge and located above and below the interlayer remain in elastic state.*

*The stress field in the extremely stressed zone of the formation is determined by the method of characteristics, and in the elastic region it is built by the method of boundary elements. The transition of the reservoir to the extremely stressed state is assessed by the Coulomb – Mohr criteria. Within the framework of the model, a computational experiment was conducted for a number of mining and geological conditions of the coal massif.*

*Based on the analysis of the obtained results, a number of features in the distribution of stresses in the edge part of the formation were revealed. It has been shown that the presence of a «weak» interlayer with a certain value of its power reduces the size of the extremely stressed zone, but increases the maximum reference pressure compared to similar parameters in a structurally homogeneous formation.*

**Keywords:** ROCK MASS, COAL BED, FORMATION MINING, EXTREMELY STRESSED ZONES, STRENGTH CHARACTERISTICS, SLIDING LINE, BOUNDARY PROBLEMS OF THE LIMIT STATE, STRENGTH CRITERION COULOMB – MORH.

#### **REFERENCES**

1. Ruppeneyt K.V. Some Questions of Rock Mechanics. M.: House of Coal, 1954. 384 p. [In Russ.].
2. Petukhov I.M., Linkov A.M. the Mechanics of rock bursts and emissions. M.: Nedra, 1983. 280 p. [In Russ.].
3. Chernov O.I., Puzyrev V.N. The forecast of sudden outbursts of coal and gas. M.: Nedra, 1979. 296 p. [In Russ.].
4. Borisov A.A. Mechanics of rock and arrays. M.: Nedra, 1980. 360 p. [In Russ.].
5. Fisenko G.L. For the Limit state of rocks around an excavation. M.: Nedra, 1976. 272 p. [In Russ.].
6. Petukhov I.M., Linkov A.M., Sidorov V.S., Feldman I.A. Theory of Protective Layers. M.: Nedra, 1976. 223 p. [In Russ.].
7. Khristianovich S.A. Continuum Mechanics. M.: Nauka, 1981. 484 p. [In Russ.].
8. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V. and et. Safety issues and new technologies for underground mining of coal deposits. Novosibirsk: Novosibirsk Writer, 2011. 524 p. [In Russ.].
9. 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.].
10. 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.].

11. Zykov V.S. Sudden emissions of coal and gas and other gas-dynamic phenomena in mines. Kemerovo, 2010. 334 p. [In Russ.].

12. Polevshchikov G.Ya., Kozyreva E.N., Shinkevich M.V. Non-linear changes in the meta-productivity of a high-performance excavation site // Industrial safety [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2014. No. 6. P. 50–54. [In Russ.].

13. Shinkevich M.V., Kozyrev E.N., Plaksin M.S. and et. Methodical bases of forecasting of the dynamics of metrobility extraction coal plot when developing powerful and contiguous layers of long columns // Bulletin of the Research center for work safety in the coal industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2017. No. 3. P. 23–29. [In Russ.].

14. Kozyreva E.N. Opportunities to improve the efficiency of gas emission control in the mining area // Bulletin of the Scientific centre VostNII for safety in the coal industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2017. No. 3. P. 30–35. [In Russ.].

15. Kozyreva E.N., Shinkevich M.V. Features of gas-geomechanical processes at the mine excavation site // Bulletin of the Scientific Center for Work Safety in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2010. No. 2. P. 28–35. [In Russ.].

16. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V., Li Hee Un and others On one approach to describing the vented gas emissions from coal reservoirs in mining operations // Labor Safety in Industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2017. No. 3. P. 23–29. [In Russ.].

17. Ermakova I.A., Piriyeva N.N. Analysis of the geomechanical state of the safety pillars at the A.D. Ruban // Mining information-analytical Bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2016. No. 7. P. 193–199. [In Russ.].

18. Cherdantsev N.V. Results of numerical solution of equations of the marginal state of the boundary zone of the formation and their approximation by polynomials // Labor Safety in Industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 6. P. 7–13. [In Russ.].

19. Sokolovsky V.V. Loose Medium Statics. M.: Nauka, 1990. 272 p. [In Russ.].

20. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Anufriev V.E. Questions of methodological and instrumental support for monitoring of mine workings. Kemerovo, 2012. 222 p. [In Russ.].

21. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Izakson V.Yu. Construction of instability regions of a two-connected rock mass with strength anisotropy // Mining information-analytical Bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2009. No. 8. P. 313–320. [In Russ.].

22. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Izakson V.Yu. Substantiation of the geomechanical model of destruction of a multi-connected rock mass with strength anisotropy // Mining information-analytical Bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2009. No. 57. P. 122–125. [In Russ.].

23. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Discontinuity zones in the junction region of two mine tunnels // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics [Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika]. 2004. T. 45. No. 4. P. 572–574. [In Russ.].

24. Cherdantsev N.V. Zones of discontinuity in the area of conjugation of two square cross-section lines // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2003. No 5. P. 19–21. [In Russ.].

25. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Izakson V.Yu. Classification of cutouts by the degree of their influence on the surrounding array // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2006. No. 5. P. 3–7. [In Russ.].

26. Cherdantsev N.V. Influence of anchor support on the stability of rock mass containing a single mine working // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2012. No. 4. P. 3–7. [In Russ.].

27. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V. Effect of precompressed spring on the discontinuity zone around a cylindrical cavity // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics [Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika]. 2005. T. 46. No. 3. P. 423–429. [In Russ.].