

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.53.53.002

УДК 622.023.23

© Н. В. Черданцев, 2025

Н. В. ЧЕРДАНЦЕВ

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



О ДЕФОРМАЦИЯХ КРАЕВОЙ ЗОНЫ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА РАЗЛИЧНОЙ ПРОЧНОСТИ

В представленной работе для оценки перехода краевой зоны угольного пласта в пластическое (предельно напряжённое состояние) приняты общий и специальный критерии прочности Кулона — Мора. Эти критерии совместно с дифференциальными уравнениями равновесия позволяют решить пластическую задачу о распределении поля напряжений в этой зоне пласта, находящегося в условиях плоской деформации, методом характеристик.

Поле деформаций, а также поле перемещений в предельно напряжённой зоне пласта находятся на основе построенного поля напряжений и в рамках теории пластического течения в форме ассоциированного закона. При этом используются метод упругих решений, а также дифференциальные соотношения между приращениями компонент поля напряжений и поля деформаций. Входящий в эти соотношения модуль деформации является переменной величиной, связанным с пределом прочности на одноосное сжатие и предельной деформацией, соответствующей его разрушению.

На основе проведённых исследований получены зависимости вертикальных и горизонтальных перемещений краевой зоны пласта для ряда значений его предела прочности. Установлено крайнее значение предела прочности пласта, ниже которого на данной глубине он начинает разрушаться.

Ключевые слова: УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ОЧИСТНАЯ ВЫРАБОТКА, КРИТЕРИЙ КУЛОНА — МОРА, АССОЦИИРОВАННЫЙ ЗАКОН ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ, ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЁННАЯ ЗОНА.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими проблемами при разработке угольных месторождений, препятствующие нормальному функционированию угледобывающего предприятия, являются геодинамические явления, среди которых особое место занимают внезапные выбросы угля и газа, а также горные удары [1–7].

Внезапные выбросы обусловлены, в первую очередь, высокой газоносностью отрабатываемых угольных пластов, а основной причиной горных ударов, приводящих к разрушениям краевой зоны пластов, является высокая концентрация напряжений в окрестности ведения горных работ [2–4, 8–18].

При исследовании геодинамических явлений первостепенное значение занимает достоверная оценка напряжённо-деформированного состояния как угольного пласта, так и массива, вмещающего этот пласт. В этой связи важную роль в прогнозных оценках геодинамических явлений играет разработка математических моделей геомеханического состояния массивов угольных месторождений, адекватно отражающих их поведение при отработке угольных пластов. Такие модели, как правило, строятся на базе фундаментальных методов механики деформируемого твёрдого тела [5–8, 17].

Одной из основных особенностей моделей, отличающих их друг от друга, является отличия в учёте физико-механических свойств массива. Иными словами, разные модели по-разному учитывают диаграмму деформирования при испытаниях образцов горных пород. Одни модели стремятся, как можно более точно учитывать диаграмму деформирования (диаграмму условных напряжений), в других моделях используются упрощённые, схематичные представления этой диаграммы [7, 8, 13].

Выбор для расчёта той или иной модели, в конечном итоге, зависит от физико-механических свойств исследуемого массива горных пород. Если массив достаточно однороден (или кусочно однороден), то в этом случае лучше воспользоваться диаграммой условных напряжений, полученной в процессе проведения испытания на образце, либо аппроксимировать диаграмму аналитическими выражениями, выделяя на диаграмме условных напряжений все характерные участки (участки вторичного упрочнения, разупрочнения, остаточной прочности). Если же в массиве имеются поверхности ослабления, представленные, например, слоистостью или кливажем, то, строго говоря, в этом случае необходимо использовать диаграммы деформирования материала как по основной породе, так и по поверхностям ослабления. В этом случае в расчётах используют упрощённые диаграммы деформирования, например, диаграмму Прандтля, на которой имеются два участка: участок упругого деформирования и участок пластичности, параллельный оси абсцисс (оси относительных деформаций), при этом участки вторичного упрочнения и разупрочнения отсутствуют [2, 5, 19].

Модели, использующие полные диаграммы деформирования, основаны на методах теории малых упругопластических деформаций, а модели, применяющие диаграмму Прандтля, используют теорию течения. Обе теории для решения сложных задач применяют метод упругих решений, согласно которому на каждом шаге численного решения задачи на основе диаграммы условных

напряжений используется свой модуль упругости, называемый модулем деформаций [20, 21].

Если в массиве существенную роль играют поверхности ослабления, в частности, из-за низкой прочности угольного пласта на контакте с массивом возникает вероятность проскальзывания пласта вдоль этого контакта, то методы математических моделей, основанные на учёте свойств полной диаграммы деформирования материала, не смогут учесть эту особенность. В этой связи результаты построения могут привести к значительному искажению компонент поля напряжений.

При переходе породы в пластическое состояние согласно теории течения можно использовать критерий Треска — Сен-Венана (наибольших касательных напряжений), критерий Губера — Мизеса (наибольшей энергии формоизменения), а также критерий Кулона — Мора. Из трёх критериев применительно к горным породам последний критерий наиболее точно описывает их переход в пластическое (предельно напряжённое) состояние [2, 7, 8].

Использование двух критериев пластичности Кулона — Мора: общего критерия по основной породе и специального критерия по поверхностям ослабления совместно с дифференциальными уравнениями равновесия позволяет получить решение задачи о распределении поля напряжений в массиве (угольном пласте) методом характеристик [2, 19, 22]. Располагая же компонентами поля напряжений, на основе ассоциированного закона пластического течения можно построить поле деформаций и перемещений [23]. Однако при построении полей деформаций необходимо располагать размером площадки текучести на диаграмме Прандтля, поскольку реальная диаграмма в отличие от идеализированной диаграммы имеет площадку конечного размера, совпадающего с предельной деформацией, соответствующей разрушению материала.

В представленной статье используется диаграмма испытания материала с конечной площадкой текучести, при достижении которой материал разрушается, полностью теряя

связность. На диаграмме этому участку разупрочнения соответствует вертикальный отрезок между площадкой текучести и осью абсцисс. В этой связи в качестве критерия разрушения угольного пласта принята величина ε_{np} .

В данной статье представлены результаты проведенных исследований напряжённо-деформированного состояния краевой зоны угольного пласта в окрестности очистной выработки для ряда характеристик прочности пласта, глубины его отработки, размеров выработанного пространства и установлены значения этих параметров, при которых происходит разрушение обрабатываемого угольного пласта.

ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ЕЁ РЕШЕНИЯ

Схема угольного пласта, монтажной камеры и очистной выработки, расположенных в массиве горных пород, представлена на рис. 1. На рисунке угольный пласт 1 на всю его мощность m , начиная от монтажной камеры 2 с размерами a_k , h_k , обрабатывается очистной выработкой 3, высота которой h , а пролёт a . Впереди выработки краевая часть угольного пласта 4 шириной L находится в предельно напряжённом состоянии. Позади монтажной камеры размер предельно напряжённой зоны 4 составляет L_k . Начало системы координат yOz установлено в центре тяжести сечения монтажной камеры. Размеры выработки вдоль оси x значительно превосходят их размеры в плоскости yOz , поэтому породы в окрестности выработки находятся в условиях плоской

деформации, и, следовательно, деформация ε_x равна нулю. В кровле и почве пласта лежат прочные и монолитные породы, значительно превышающие прочность угольного пласта. Массив нагружен равнокомпонентным гравитационным давлением γH (γ — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород, H — глубина заложения выработки).

Распределение напряжений в краевой предельно напряжённой зоне пласта производится путём совместного решения системы дифференциальных уравнений равновесия, а также общего и специального критериев предельного состояния Кулона – Мора [2, 22]. Общий критерий формулирует условие по пласту, а специальный критерий формулирует условие по контакту пласта с массивом, на котором характеристики прочности меньше, чем по пласту. Полученная система уравнений решается методом характеристик [22]. Применение этого метода к расчёту предельной зоны пласта подробно изложено в работе [19].

После построения напряжений в предельно напряжённых зонах пласта может быть поставлена и решена задача о распределении напряжений в окружающем массиве, в том числе и в остальной (упругой) области угольного пласта. Путём замены предельно напряжённых зон пласта напряжениями, действующими на его контакте с массивом, эта задача приводится ко второй внешней краевой задаче теории упругости, и её решение сводится к численному решению интегрального уравнения Фредгольма второго рода [23]. В плоской задаче интегрирование ведётся по

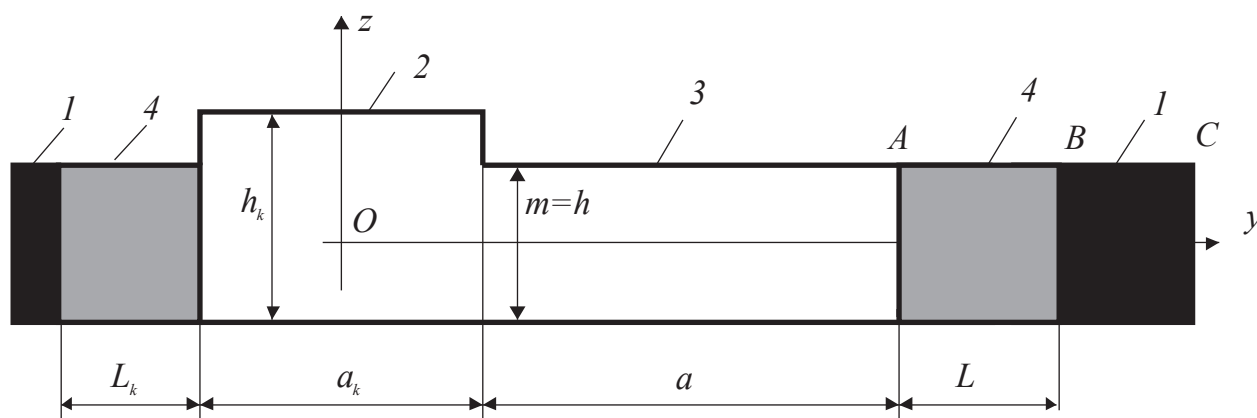


Рис. 1. Схема очистной выработки с монтажной камерой

замкнутому контуру, включая контур выработки и контур контакта пласта с окружающим массивом [5, 24].

Суммарный размер предельно напряжённой зоны, входящий в общий размер контура интегрирования и подлежащий определению, сначала задаётся, а после решения уравнения Фредгольма и удовлетворения статических граничных условий на границе упругой области и предельно напряжённой зоны (в точке В, расположенной на линии АВС (рис. 1)), он считается окончательным, а упругая задача решённой.

При решении поставленной задачи используются следующие механические характеристики угольного пласта. Характеристики упругости: E — модуль продольной упругости, μ — коэффициент Пуассона; характеристики прочности и пластичности: σ_0 — предел прочности на одноосное сжатие, K — коэффициент сцепления, ρ — угол внутреннего трения, σ'_0 — предел прочности на сжатие, K' — коэффициент сцепления, ρ' — угол внутреннего трения на контакте пласта с остальным массивом. ε_{np} — относительная предельная деформация при одноосном сжатии, ν — коэффициент поперечной деформации пласта в предельно напряжённой зоне.

Решение задачи предельного состояния методом характеристик [22] предполагает, что деформирование пласта, а следовательно, рост интенсивности его деформаций ε_u происходит при постоянной интенсивности напряжений σ_u . Интенсивность напряжений согласно критерию Кулона – Мора равна пределу прочности σ_0 пласта и соответствует идеализированной диаграмме Прандтля, т. е. без упрочнения [7, 8]. Реальные материалы, в том числе горные породы, имеют ограниченный участок интенсивности деформаций, который для каждого конкретного материала устанавливается из результатов эксперимента либо на основе справочной литературы [6–8]. В этой связи построение поля деформаций и перемещений в предельной зоне пласта производится в рамках теории пластического течения [20, 21].

В предлагаемой статье представлены лишь результаты решения задачи о деформировании краевой зоны пласта, подробное же решение задачи о деформированном состоянии пласта с основными зависимостями достаточно подробно приведено в работах [24, 25].

ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ниже приведены результаты вычислительного эксперимента. В качестве исходной информации приняты следующие значения параметров массива и выработки, при этом ряд физико-механических характеристик пласта взят из справочных данных, приведённых в [2, 7, 8]. $H=650$ м, $\gamma=25$ кН/м³, $E=6,5 \cdot 10^3$ МПа, $\mu=0,29$; $\rho=20^\circ$, $\varepsilon_{np}=0,018$; $\rho'=10^\circ$, $\sigma'=0$ ($K'=0$), $a=15$ м, $a_k=5$ м, $h_k=4,5$ м, $h=3$ м. Предел прочности пласта σ_0 в ходе вычислительного эксперимента менялся.

На рис. 2 а показана эпюра главного вертикального нормального напряжения σ_z (кривые 1, 2) и σ_y (кривые 3, 4) в кровле угольного пласта, предел прочности которого $\sigma_0=10$ МПа, а на рис. 2 б эпюры σ_1 (кривые 1, 2) и σ_3 (кривые 3, 4) построены вдоль оси пласта.

Цифрами 1, 3 обозначены части эпюр в предельно напряжённой зоне пласта, цифрами 2, 4 — в упругой области. Из рисунков следует, что параметры опорного давления принимают следующие значения: в кровле пласта $\sigma_{z,max}=2,105 \gamma H$ (34,21 МПа), $L=5,62$ м; вдоль оси пласта $\sigma_{z,max}=\sigma_{1,max}=2,086 \gamma H$ (33,9 МПа). Из сравнения результатов напряжений следует, что значения максимумов напряжений в кровле пласта и вдоль оси практически совпадают. Отсюда следует, что вертикальные напряжения σ_z по высоте пласта меняются незначительно и при построении полей деформаций и перемещений в краевой зоне пласта можно использовать эпюру распределения напряжений вдоль оси пласта.

На рис. 3 построен график зависимости интенсивности деформаций ε_u в предельно напряжённой зоне пласта от координаты y , отсчитываемой вдоль оси пласта. Максимальное значение 0,029 интенсивность принимает

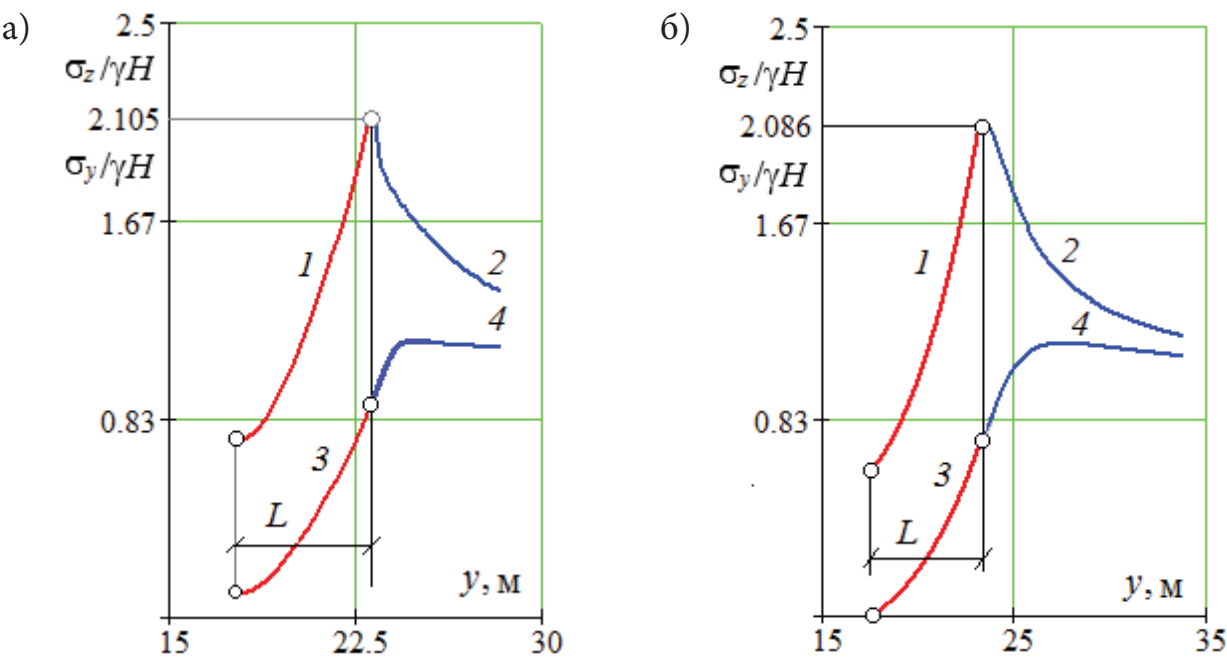


Рис. 2. Эпюры напряжений σ_z , σ_y в кровле пласта (а) и вдоль его оси (б)

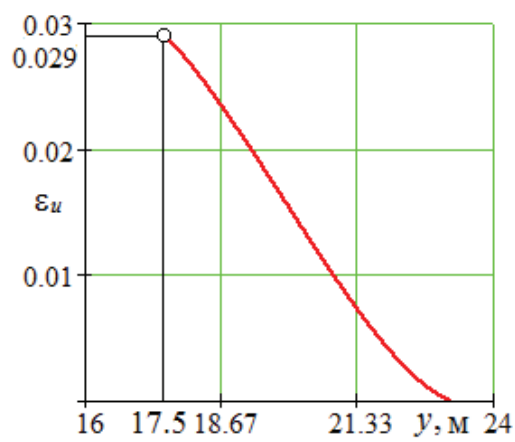


Рис. 3. График распределения интенсивности деформаций в предельно напряжённой зоне пласта вдоль его оси.

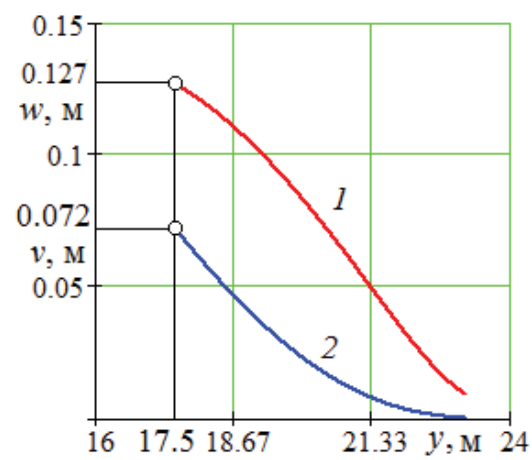


Рис. 4. Графики распределения вертикальных (кривая 1) и горизонтальных (кривая 2) перемещений в предельной зоне вдоль его оси.

на кромке пласта. Эта величина меньше значения интенсивности деформаций $\epsilon_{u.0}$ при одноосном сжатии, которое при исходных данных принимает значение 0,036, поэтому разрушения краевой зоны пласта не произойдёт.

На рис. 4 построены графики зависимости перемещений пласта в его предельно напряжённой зоне от абсциссы y . Из анализа графиков следует, что существенный рост этих параметров происходит в части пласта, близко примыкающей к его кромке. Кривая 1 обозначает график вертикальных

перемещений (смещений) w , а кривая 2 – график горизонтальных перемещений v . Максимальное сжатие пласта на кромке составляет 0,127 м, а смещение пласта в выработку составляет 0,072 м.

На рис. 5–8 приведены графические результаты исследований параметров напряжённо-деформированного состояния пласта в предельно напряжённой зоне при изменении предела прочности угольного пласта. При проведении исследований принято, что характеристики ϕ , ϕ' , σ' , ϵ_{np} не изменяются при изменении предела прочности пласта.

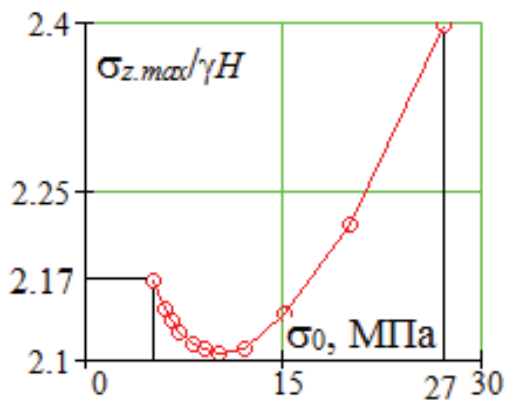


Рис. 5. График зависимости максимума опорного давления пласта от его предела прочности.

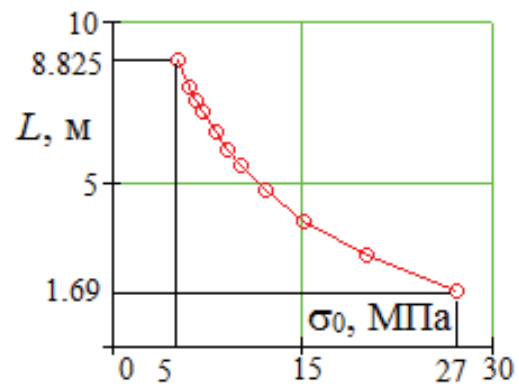


Рис. 6. График зависимости ширины предельной зоны пласта от его предела прочности.

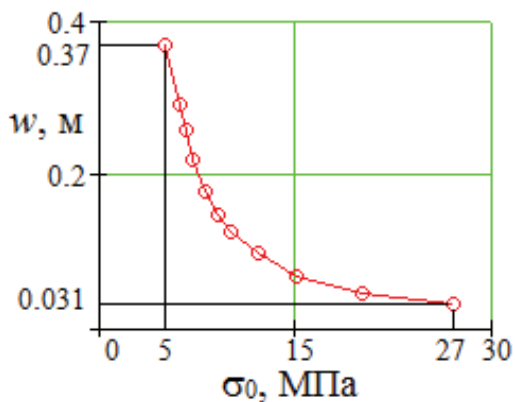


Рис. 7. График зависимости вертикальных смещений w на кромке пласта.

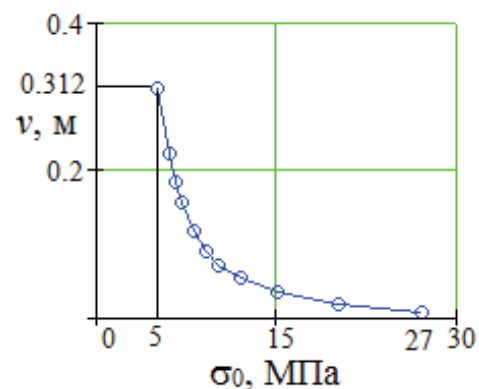


Рис. 8. График зависимости горизонтальных смещений v на кромке пласта.

Так, например, на рис. 5 представлен график изменения максимума опорного давления в зависимости от предела прочности пласта σ_0 . Из графика следует, во-первых, минимальное значение максимума напряжений $\sigma_{z,max}$ достигается при $\sigma_0=10$ МПа, во-вторых, разница между значениями максимумов на исследуемом участке изменения σ_0 незначительна, менее 15 %, хотя предел прочности при этом изменяется в 2,7 раза.

На рис. 6 построен график изменения ширины предельно напряжённой зоны в зависимости от предела прочности пласта. График представляет плавную пологую убывающую вогнутую кривую, не имеющую экстремумов, которая на исследуемом участке значительно (в несколько раз) изменяет свои значения на исследуемом интервале.

На рис. 7, 8 построен графики зависимости вертикальных смещений кромки пласта

от его предела прочности. Графики имеют вид плавных убывающих кривых, обращённых выпуклостью вниз. Из графика следует, что с уменьшением σ_0 смещения на кромке пласта резко возрастают и при $\sigma_0=5$ МПа вертикальное смещение (абсолютная деформация сжатия пласта) достигает величины 0,37 м, а отжим пласта составляет 0,312 м.

На рис. 9 построены два графика. График 1 — график зависимости интенсивности деформаций на кромке пласта от его предела прочности. График представляет собой вид плавно убывающей вогнутой кривой.

График 2 на рис. 9 — прямая линия, параллельная оси абсцисс и соответствующая предельной интенсивности образца при одноосном сжатии. Как уже было отмечено выше, это значение равно 0,036. Из рисунка следует, что абсцисса точки пересечения графиков равна 8,4 МПа.

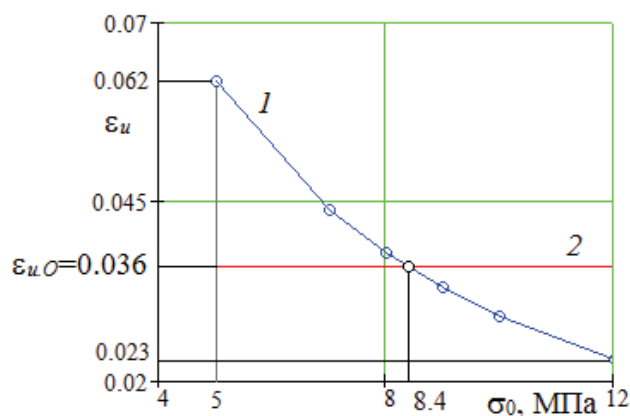


Рис. 9. График зависимости интенсивности деформаций пласта от его предела прочности.

Таким образом, при значениях предела прочности пласта ниже 8,4 МПа интенсивность деформаций на кромке пласта превысит предельную интенсивность деформаций при одноосном сжатии и, следовательно, в этом месте произойдёт разрушение пласта с полной потерей связности. Используя описанный подход к оценке разрушения пласта со значением его предела прочности, меньшим 8,4 МПа, можно определить размер участка, на котором соблюдается условие разрушения по критерию интенсивности деформаций. Для этой цели нужно провести расчёты, подобные расчётам, представленным на рис. 2, 3, и затем из аналогичного графика на рис. 3 графика найти абсциссу точки, соответствующей ординате 0,036. Разница между найденной абсциссой и абсциссой кромки пласта и есть размер участка полной потери его связности.

ВЫВОДЫ

1. Принятие общего и специального критериев Кулона — Мора в качестве оценки при переходе пласта в предельно напряжённое

(пластическое) состояние, которое предполагает, что его деформирование следует диаграмме Прандтля, позволяют построить поле напряжений и в угольном пласте, и во всём массиве горных пород, используя при этом одни лишь уравнения равновесия. Поля деформаций и перемещений в пласте могут быть построены в рамках теории течения и с помощью зависимостей ассоциированного закона пластического течения, в которые входят компоненты построенного поля напряжений.

2. В краевой предельно напряжённой зоне пласта за счёт деформаций уменьшение его мощности, а также величина отжима, связанного с горизонтальными смещениями пласта внутрь выработанного пространства, могут быть весьма существенными. При относительно небольшой прочности пласта, а также достаточно большой величине предельной деформации $\epsilon_{пр}$ эти перемещения могут достигать нескольких десятков сантиметров.

3. Согласно деформационному критерию разрушения горных пород при $\epsilon_{пр} = 0,018$ разрушение пласта, мощность которого составляет 3 м, на глубине 650 м и пролёте очистной выработки 15 м произойдёт, если предел прочности пласта окажется меньше величины 8,4 МПа.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0013 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений. 2024–2025 гг.» (рег. № 1022041300134-5-1.5.1;2.7.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходот В. В. Внезапные выбросы угля и газа. М.: ГНГИ, 1961. 363 с.
2. Фисенко Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
3. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
4. Winton J. G. A review of energy associated with coal bursts // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28 Iss. 5. P. 755–761.

5. Черданцев Н. В. Об одном подходе к построению решения задачи о выбросе угля и метана из краевой зоны пласта // Прикладная математика и механика. 2023. № 1. С. 81-111.
6. Баклашов И. В. Основы геомеханики. Т.1. М.: Изд-во Моск. гос. геол. ун-та, 2004. 208 с.
7. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1984. 382 с.
8. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра, 1992. 224 с.
9. H. Jiang. Simple three-dimensional Mohr-Coulomb criteria for intact rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 105. P. 145–159.
10. X. Sia, F. Gongab, X. Liab, S. Wangc, S. Luo. Dynamic Mohr–Coulomb and Hoek–Brown strength criteria of sandstone at high strain rates // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. Vol. 115. P. 48–59.
11. S. Wuab, S. Zhang, G. Zhang. Three-dimensional strength estimation of intact rocks using a modified Hoek-Brown criterion based on a new deviatoric function // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 107. P. 181–190.
12. Корчак П. А. Геомеханический прогноз развития зон хрупкого разрушения в окрестности сопряжения горных выработок в перенапряженном породном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5. С. 85–98.
13. Захаров В. Н., Трофимов В. А., Шляпин А. В. Закономерности формирования напряженного состояния горных пород в кровле выработанного пространства при его развитии // Горная промышленность. 2021. № 6. С. 68–75.
14. Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А., Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Обобщение современных сведений о корреляционных зависимостях предела прочности на сжатие с иными прочностными показателями горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6. С. 5–19.
15. Криницын Р. В. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород при отработке месторождений Урала // Горная промышленность. 2022. № 5. С.79–82.
16. Сашурин А. Д., Панжин А. А. Современные проблемы и задачи геомеханики // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3-1. С. 188–198.
17. Черданцев Н. В. Решение задачи о раскрытии метаном трещин в предельно напряжённой зоне пласта // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 2. С. 13-19.
18. Пучков Л. А., Шаровар И. И., Виткалов В. Г. Геотехнические способы разработки месторождений. М.: Горная книга, 2006. 322 с.
19. 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.
20. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
21. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1990. 400 с.
22. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
23. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. М.: Наука, 1981. 688с.
24. Черданцев Н.В. Деформированное состояние угольного пласта в краевой зоне и условие его разрушения при отработке очистной выработкой // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 8. С. 55-60.
25. Черданцев Н.В. Решение задачи о деформированном состоянии краевой зоны угольного пласта, отрабатываемого очистной выработкой // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2024. № 2. С. 5-14.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.53.53.002

UDC 622.023.23

© N. V. Cherdantsev, 2025

N. V. CHERDANTSEV

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: nvch2014@yandex.ru

ON DEFORMATIONS OF THE MARGINAL ZONE OF A COAL SEAM OF VARIOUS STRENGTHS

In the presented work, general and special Coulomb–Mohr strength criteria are adopted to assess the transition of the marginal zone of the coal seam to a plastic (extremely stressed state). These criteria, together with the differential equations of equilibrium, make it possible to solve the plastic problem of the stress field distribution in this zone of a formation under conditions of plane deformation using the characteristics method.

The field of deformations, as well as the field of displacements in the extremely stressed zone of the formation, are based on the constructed stress field and within the framework of the theory of plastic flow in the form of an associated law. In this case, the method of elastic solutions is used, as well as the differential relations between the increments of the components of the stress field and the strain field. The modulus of deformation included in these relations is a variable value related to the uniaxial compressive strength and the ultimate deformation corresponding to its destruction.

Based on the conducted studies, the dependences of vertical and horizontal displacements of the marginal zone of the formation for a number of values of its ultimate strength are obtained. The extreme value of the reservoir strength limit has been established, below which it begins to collapse at a given depth.

Keywords: COAL SEAM, SEWAGE TREATMENT PLANT, COULOMB–MOHR CRITERION, ASSOCIATED PLASTIC FLOW LAW, EXTREMELY STRESSED ZONE.

REFERENCES

1. Khodot V. V. Sudden emissions of coal and gas. Moscow: GNGI, 1961. 363 p. [In Russ.].
2. Fisenko G. L. Limiting conditions of rocks around workings. Moscow: Nedra, 1976. 272 p. [In Russ.].
3. Petukhov I. M., Linkov A.M. Mechanics of rock impacts and emissions. Moscow: Nedra. [In Russ.].
3. Petukhov I. M., Linkov A.M. Mechanics of rock impacts and emissions. Moscow: Nedra, 1983. 280 p. [In Russ.].
4. Winton J. G. A review of energy associated with coal bursts // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. Vol. 28 Iss. 5. P. 755–761.
5. Cherdantsev N. V. On one approach to constructing a solution to the problem of coal and methane emission from the marginal zone of the reservoir // Applied Mathematics and Mechanics. 2023. No. 1. P. 81–111. [In Russ.].
6. Baklashov I. V. Fundamentals of Geomechanics. Vol. 1. Moscow: Publishing House of the Moscow State Geological Museum. University, 2004. 208 p. [In Russ.].
7. Bulychev N. S. Mechanics of underground structures. Moscow: Nedra, 1984. 382 p. [In Russ.].
8. Stavrogin A. N., Protosenya A. G. Mechanics of deformation and destruction of rocks. Moscow: Nedra, 1992. 224 p. [In Russ.].

9. H. Jiang. Simple three-dimensional Mohr-Coulomb criteria for intact rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 105. P. 145–159.
10. X. Sia, F. Gongab, X. Liab, S. Wangc, S. Luo. Dynamic Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength criteria of sandstone at high strain rates // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019. Vol. 115. P. 48–59.
11. S. Wuab, S. Zhang, G. Zhang. Three-dimensional strength estimation of intact rocks using a modified Hoek-Brown criterion based on a new deviatoric function // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 107. P. 181–190.
12. Korchak P. A. Geomechanical forecast of the development of brittle fracture zones in the vicinity of the interface of mine workings in an overstressed rock mass // Mining information and Analytical Bulletin. 2021. No. 5. P. 85–98. [In Russ.].
13. Zakharov V. N., Trofimov V. A., Shlyapin A.V. Patterns of formation of the stressed state of rocks in the roof of the developed space during its development // Mining Industry. 2021. No. 6. P. 68–75. [In Russ.].
14. Zhabin A. B., Polyakov A.V., Averin E. A., Linnik Yu. N., Linnik V. Yu. Generalization of modern information on the correlation dependences of compressive strength with other strength indicators of rocks // Mining Information and Analytical Bulletin. 2022. No. 6. P. 5–19. [In Russ.].
15. Krinitsyn R. V. Stress-strain state of a rock mass during mining of deposits in the Urals // Mining industry. 2022. No. 5. P.79–82. [In Russ.].
16. Sashurin A.D., Panzhin A. A. Modern problems and tasks of geomechanics // Mining Information and Analytical Bulletin. 2020. No. 3-1. P. 188–198. [In Russ.].
17. Cherdantsev N. V. Solving the problem of methane cracking in the extremely stressed zone of the reservoir // Occupational safety in industry. 2022. No. 2. P. 13–19.
18. Puchkov L. A., Sharovar I. I., Vitkalov V. G. Geotechnical methods of field development. Moscow: Gornaya kniga, 2006. 322 p. [In Russ.].
19. Cherdantsev N. V. Investigation of the extremely stressed state of the formation in its marginal zone by methods of fluid mechanics // Mining Information and Analytical Bulletin 2020. No. 3. P. 45–57. [In Russ.].
20. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с. [In Russ.].
21. Alexandrov A.V., Potapov V.D. Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. Moscow: Higher School, 1990. 400 p. [In Russ.].
22. Sokolovsky V. V. Statics of the bulk medium. Moscow: Nauka Publ., 1990. 272 p. [In Russ.].
23. Parton V.Z., Perlin P.I. Methods of mathematical theory of elasticity. Moscow: Nauka, 1981. 688 p. [In Russ.].
24. Cherdantsev N.V. Deformed state of the coal seam in the marginal zone and the condition of its destruction during treatment by a sewage treatment plant // Occupational safety in industry. 2023. No. 8. P. 55–60. [In Russ.].
25. Cherdantsev N.V. Solving the problem of the deformed state of the marginal zone of a coal seam being worked out by a sewage treatment plant // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety. 2024. No. 2. P. 5–14. [In Russ.].