

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.45.97.002

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



РАСЧЁТ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ С НЕПРОЧНЫМ ПРОСЛОЙКОМ, ОТРАБАТЫВАЕМЫМ ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКОЙ

Задача о напряжённом состоянии углепородного массива, вмещающего угольный пласт, обрабатываемого очистной выработкой, относится к классу плоских упруго пластических задач. Для построения поля напряжений в краевой предельно напряжённой зоне пласта использованы критерии Кулона – Мора перехода пласта в предельное состояние, а также методы механики сыпучей среды, разработанные Соколовским. При наличии в угольном пласте непрочного прослойка предельное состояние наступает сначала в нём, а затем на некотором удалении от его кромки и в пласте. Оно наступает в том случае, когда приведённое напряжение в прослойке достигает значения приведённого напряжения в пласте, соответствующего его пределу прочности на одноосное сжатие. После этого пласт и прослойка работают совместно. На основе построенного поля напряжений в пласте задача о напряжённом состоянии массива сводится к задаче теории упругости и решается методом граничных элементов и последовательных приближений. По результатам вычислительного эксперимента получены параметры опорного давления обрабатываемого пласта в зависимости от ширины выработки. Приведены сравнительные оценки с аналогичными параметрами при обработке однородного пласта.

Ключевые слова: МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, НЕПРОЧНЫЙ ПРОСЛОЕК ГОРНАЯ ВЫРАБОТКА, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ, ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫЕ ЗОНЫ, ЛИНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ, МЕТОД ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.

ВВЕДЕНИЕ

Построение полей напряжений и деформаций в углепородном массиве горных пород, вмещающем угольный пласт и движущуюся по нему выработку, является довольно сложной научной задачей и актуальной производственной проблемой. Для её решения необходимо использовать фундаментальные методы механики деформируемого твёрдого тела, поскольку именно с их помощью можно получить наиболее достоверные результаты о напряжённом состоянии массива и использовать их для выбора эффективных технологических решений.

Наиболее важными параметрами поля напряжений в углепородном массиве являются параметры опорного давления, к которым относятся максимум опорного давления, действующего на угольный пласт и ширина предельно напряжённой зоны. Максимумом опорного давления считается наибольшее значение вертикальной компоненты нормального напряжения, действующего на границе предельно напряжённой зоны пласта и его упругой области. Именно эти параметры определяют геодинамическую обстановку при обработке угольных месторождений подземным способом, являясь основными

факторами в прогнозных оценках ряда геодинамических явлений (горных ударов, внезапных выбросов из забоев выработок горной массы, пучения почвы и значительных смещений их кровли) согласно существующим теориям и методикам [1–11]. Кроме этого, параметры опорного давления необходимо учитывать при выборе и расчёте крепи горных выработок, оказывающихся в зоне влияния очистных работ [12, 13].

Целью данной статьи является решение задачи о переходе угольного пласта в предельное состояние при наличии в нём непрочного прослойка, определение параметров опорного давления пласта, анализ полученных результатов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЁ РЕШЕНИЕ

Задача о напряжённом состоянии углепородного массива, вмещающего угольный пласт, отрабатываемый очистной выработкой, формулируется следующим образом (рис. 1). В массиве горных пород, моделируемом бесконечной плоскостью, на глубине H по угольному пласту 1 мощностью m , вмещающем непрочный прослойк 2 мощностью h_s , пройдена сначала монтажная камера 3 (для монтажа угледобычного оборудования) шириной a_k и высотой h_k , а затем проводится очистная выработка 4, оснащённая механизированной крепью 5. Ширина выработки a_v , а её высота h , равная мощности пласта.

Плоскость нагружена сверху, снизу и с боков равнокомпонентным гравитационным давлением γH (γ — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород).

В расчётах используются следующие характеристики пласта: σ_0 — предел прочности на одноосное сжатие, K — коэффициент сцепления, ρ — угол внутреннего трения. Характеристики прочности пород по контактам пласта с прослойком и с остальным массивом: K' — коэффициент сцепления, ρ' — угол внутреннего трения. Характеристики прочности прослойка: σ_{0s} — предел прочности на одноосное сжатие, ρ_s — угол внутреннего трения.

Характеристики прочности прослойка выше, чем на контакте его с пластом и на контакте пласта с массивом, но ниже, чем характеристики прочности самого пласта, которые, в свою очередь, ниже характеристик прочности вмещающего массива.

Механизм формирования предельно напряжённых зон с образованием линий скольжения (рис. 1) изложен в работах [3, 14, 15]. В них показано, что предельно напряжённые зоны структурно однородного пласта развиваются вглубь пласта, 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 . При увеличении σ_1 зона неупругих деформаций в бортах выработки увеличивается. В этой зоне пласт деформируется не только по направлению его мощности, но и в плоскости с окружающими породами, где происходит его проскальзывание. В этой связи в нём одновременно реализуются два предельных состояния равновесия: общее или обыкновенное (состояние самого пласта) [3, 16–18] и специальное (состояние по контакту

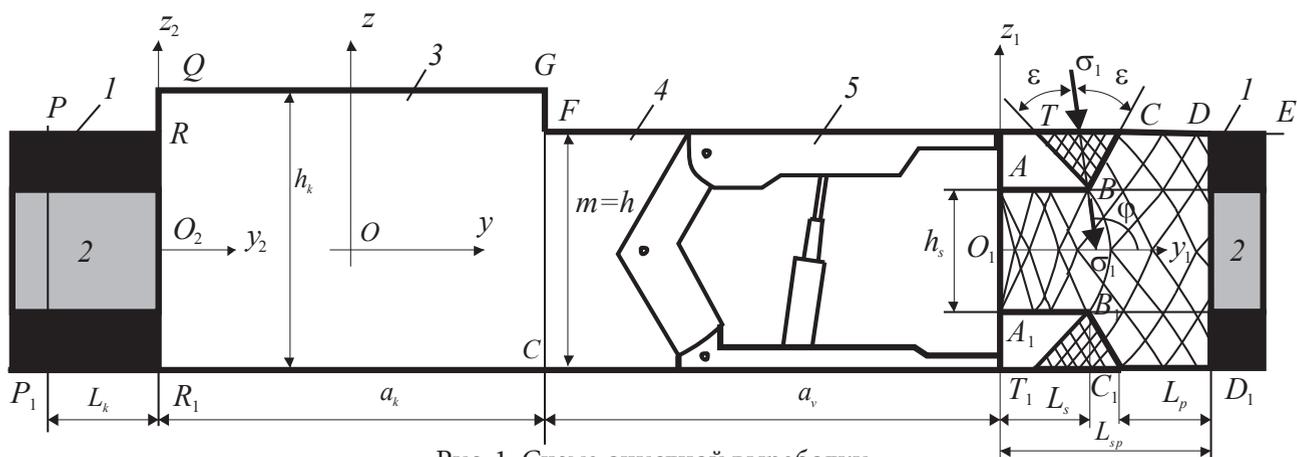


Рис. 1. Схема очистной выработки

пласта с массивом) [3, 16]. Эти два условия соответствуют критериям Кулона – Мора для прямолинейных огибающих кругов предельных состояний по пласту и по поверхности ослабления (контакту пласта с массивом).

Задача усложняется, если угольный пласт не является однородным, а вмещает непрочный прослойку (прослойки), чьи характеристики прочности существенно отличаются от аналогичных характеристик самого пласта. В этом случае в предельное состояние переходит сначала прослойка, затем на некотором расстоянии от кромки пласта в предельном состоянии оказывается и сам пласт (рис. 1). Если же характеристики прочности пород кровли и почвы пласта незначительно превышают характеристики прочности самого пласта, то в дальнейшем предельное состояние испытают и породы вмещающего массива.

Критерии Кулона – Мора совместно с дифференциальными уравнениями равновесия образуют систему уравнений о напряжённом состоянии краевой зоны угольного пласта. В задаче с плоской деформацией путём перехода от компонентов тензора напряжений к приведённому напряжению σ и углу наклона φ между осью u и напряжением σ_1 система сводится к двум уравнениям, относящимся к уравнениям гиперболического типа [16].

Уравнения гиперболического типа решаются методом характеристик (характеристических линий), в котором они совпадают с линиями скольжения материала [16]. На характеристиках уравнения упрощаются, но, несмотря на это, их интегрирование в замкнутом виде получается только на участках пласта, расположенных в непосредственной близости к его обнажению.

Схема линий скольжения в предельно напряжённой зоне прослойка на участке ABB_1A_1 показана на рис. 1, а в борту монтажной камеры предельно напряжённая зона PRR_1P_1 , имеющая такую же структуру линий скольжения.

В случае перехода угольного пласта в предельное состояние в нём, в первую очередь, образуется треугольная предельная область BCT ($B_1C_1T_1$) с простым (одноосным)

напряжённым состоянием сжатия, примыкающая к пласту в точке B (B_1) (рис. 1). В этой области возникает две системы изогональных линий скольжения, составляющих между собой угол 2ε , и наклонённых под углом $\pm\varepsilon$ к направлению главного напряжения σ_1 , действующим в точке B предельной зоны пласта, расположенной на расстоянии L_s от его кромки (рис. 2). Оно совпадает с направлением главного напряжения σ_1 в угольном пласте, которое для простого напряжённого состояния равно его пределу прочности на одноосное сжатие σ_0 .

Следует отметить, что в месте перехода пласта в предельное состояние оно не должно сопровождаться разрывами перемещений точек пласта и прослойка, а, следовательно, не должно быть разрывов и в их линиях скольжения, т. е. из прослойка они плавно переходят в пласт. Однако разрывы в производных перемещений при разных значениях углов внутреннего трения угольного пласта ρ и прослойка ρ_s возможны, что выражается разными углами наклона к горизонту линий скольжения пласта и прослойка в месте их стыка.

Из сказанного выше следует, что при соблюдении этих условий должно выполняться равенство приведённых напряжений в угольном пласте и в прослойке:

$$\sigma_p = \sigma_s \quad (1)$$

В этом условии σ_s — приведённое напряжение в прослойке, σ_p — приведённое напряжение в угольном пласте. Причём в угольном пласте при одноосном сжатии приведённое напряжение определяется по формуле [3] $\sigma_p = \sigma_0 / \sin \rho$, а в прослойке — $\sigma_s = \sigma_{sB}$, т. е. принимает значение приведённого напряжения в точке B (рис. 1).

После выполнения этого условия прослойка и пласт деформируются совместно, их линии скольжения на участке $BCDD_1C_1B_1$ (рис. 1) становятся едиными и для прослойка, и для пласта.

Характер распределения эпюр напряжений в предельно напряжённой зоне, вычисленных по формулам [3, 16] вдоль контактов пласта с массивом, перешедшего в предельное

состояние, а также вдоль прослойка с пластом (вдоль линии $ABCD$ на рис. 1), представляет вид попеременно сменяющихся постоянных и нелинейных участков. Причём в точке B при переходе линии скольжения прослойка в линию скольжения пласта из-за разных характеристик прочности пласта и прослойка эпюры, нормальных напряжений в своих значениях должны испытывать разрывы.

При решении упругопластической задачи о пластовой выработке в углепородном массиве, ступенчато меняющиеся эпюры напряжений, несмотря на их разрывы в точке B (рис. 1) вполне можно аппроксимировать монотонными функциями в виде полиномов, степень которых определяется протяжённостью предельно напряжённой зоны [15].

Упругопластическая задача о выработке и предельно напряжённых краевых зонах пласта путём замены этих зон реактивными усилиями, действующими на их границе, может быть сведена ко второй внешней краевой задаче теории упругости [11, 14] о напряжённом состоянии упругого массива, вмещающего вырез (полость). Задача формулируется в статических граничных условиях и в общем виде сводится к решению интегрального уравнением Фредгольма второго рода относительно плотности поверхностной (фиктивной) нагрузки, приложенной к контуру выработки [19, 20]. Данный подход к решению задач теории упругости называется методом граничных интегральных уравнений, а в численной интерпретации — это метод граничных элементов. Этот метод лежит в основе разработанной модели геомеханического состояния анизотропного по прочности массива горных с системой выработок. Модель использовалась для проведения исследований напряжённого состояния массива, его нарушенности и устойчивости в окрестности, как одиночных выработок, так и системы выработок [21-25].

В отличие от классической задачи теории упругости, в которой контур выреза задан, в данной задаче граничные условия формулируются не только по контуру выработки, но и по контуру, включающему

кровлю, почву выработки и контактах пласта с окружающим массивом и прослойка с пластом на участке предельных зон, размеры которой заранее неизвестны. На рис. 1 этот контур обозначен граничными точками $ABTCDD_1C_1T_1B_1A_1R_1P_1PRQGF$.

Разработанная на основе описанного выше подхода к оценке состояния краевой зоны пласта модель подробно изложена в работах [11, 14]. В них построены компьютерные модели линий скольжения в предельно напряжённой зоне и представлены результатам параметров опорного давления в окрестности пластовых выработок.

ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛЕНИЙ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках представленной модели проведён вычислительный эксперимент, за исходные данные в котором приняты следующие параметры массива, выработки и пласта: $H = 650$ м, $\gamma = 25$ кН/м³, $\sigma_0 = 10$ МПа, $\rho = \rho_s = 20^\circ$, $\sigma_{0s} = 1,95$ МПа, $\rho_s = 20^\circ$, $\rho' = 10^\circ$, $K' = 0$, $a_k = 5$ м, $a_v = 45$ м, $h_k = 4,5$ м, $h = 3$ м, $h_s = 0,75$ м.

На рис. 2 построен график распределения приведённого напряжения σ , действующего вдоль кровли прослойка (линия 1). Он имеет вид ступенчато возрастающей линии. Кривая 2 — кривая, аппроксимирующая линию 1 полиномом шестой степени.

Для наглядности представления результатов решение задачи о распределении напряжений в предельно напряжённых зонах пласта в забое очистной выработки и в окрестности монтажной камеры производилось в локальной системе координат, установленных на кромках (в забоях) пласта: в очистной выработке в системе координат $y_1O_1z_1$, в монтажной камере в системе $y_2O_2z_2$ (рис. 1).

С помощью условия (1) нетрудно установить связь между значениями характеристик прочности прослойка, при которых пласт переходит в предельное состояние, и максимум опорного давления в прослойке.

В этом случае приведённое напряжение в прослойке σ_s является функцией координаты:

$$\frac{\sigma_0}{2 \sin \rho} = \sigma_s(L_s)$$

отсюда следует зависимость предела прочности пласта от параметров опорного давления в прослойке:

$$\sigma_0 = 2\sigma_s(L_s) \sin \rho$$

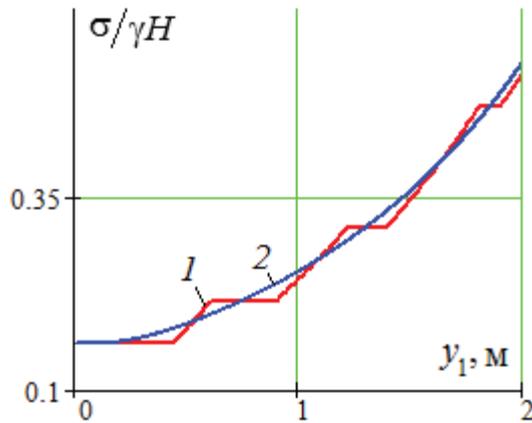


Рис. 2. Эпюра приведённого напряжения $\sigma = \sigma_s$ вдоль кровли прослойка (линия 1) и его аппроксимация полиномом шестой степени (кривая 2)

В правую часть соотношения (2) входит одна из характеристик прочности угольного пласта (угол внутреннего трения ρ), которая, как правило, задаётся, поскольку является довольно устойчивой величиной и мало

зависит от типа горной породы, то в данном случае можно воспользоваться справочными данными, приведёнными, например, в [13]. Для большинства осадочных горных пород, в том числе и для угольных пластов, угол внутреннего трения колеблется в пределах от 20° до 25° . В этой связи ρ можно принять, равным углу внутреннего трения ρ_s прослойка.

С помощью полученной зависимости (2) и графика 2 на рис. 2 можно установить размер L_s , при котором пласт перейдёт в предельно напряжённое состояние. При указанных характеристиках прослойка и пласта $L_s = 2,4$ м.

На рис. 3 построена сетка линий скольжений в прослойке и угольном пласте после того, как и угольный пласт перешёл в предельное состояние. На нём точки соответствуют точкам рис. 1.

На рис. 4а построена эпюра напряжений σ_z вдоль кровли прослойка и пласта (вдоль линии ABCD на рис. 1). Линией 1 отмечены ступенчато изменяющиеся реальные эпюры, а линией 2 — аппроксимирующие их полиномы пятой степени. На этом рисунке виден скачок нормальных напряжений при переходе предельного состояния от прослойка в угольный пласт (от точки B к точке C). Как отмечено ранее, это связано с резким изменением характеристик прочности прослойка и пласта в точке перехода пласта в предельное состояние.

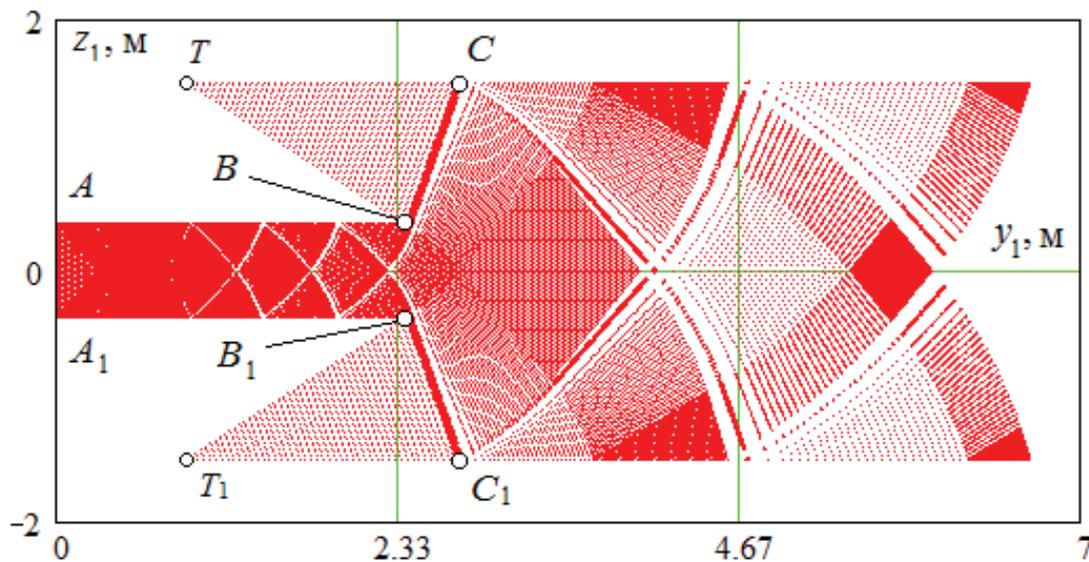


Рис. 3. Сетка линий скольжения в прослойке и угольном пласте

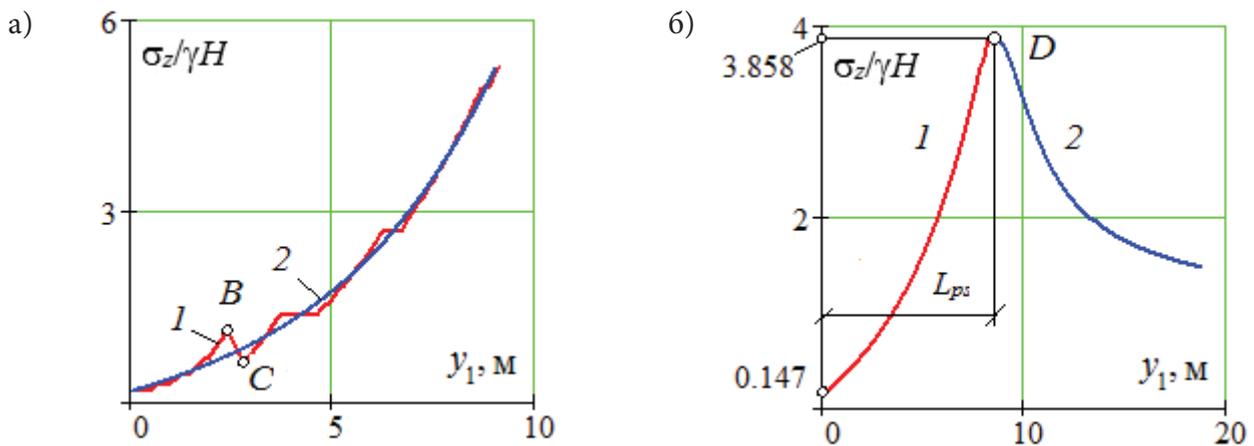


Рис. 4. Эпюры вертикального напряжения σ_z вдоль кровли прослойка и пласта и его аппроксимация полиномом пятой степени (а). Эпюра нормальных σ_z вдоль контактов кровли пласта и кровли породного слоя с породным массивом (б)

На рис. 4б показаны результаты решения упруго пластической задачи в виде построенной эпюры напряжений σ_z , являющейся также эпюрой опорного давления.

Эпюра σ_z построена вдоль кровли прослойка и пласта впереди очистной выработки (вдоль линии ABCDE на рис. 1). Линией 1 обозначена эпюра в предельно напряжённой зоне, а линией 2 — в упругой области. Максимальное значение напряжения действует на границе предельно напряжённой зоны пласта и породного слоя и упругой области массива (точка D на рис. 1) и равно $3,858 \gamma H$ (62,693 МПа). При этом ширина предельной зоны составляет 8,022 м.

По результатам решения аналогичной упругопластической задачи, но с однородным пластом (без прослойка), получены следующие параметры опорного давления. Впереди очистной выработки максимум опорного давления равен $2,892 \gamma H$ (46,995 МПа), а ширина предельно напряжённой зоны составляет 7,025 м.

Сравнение результатов параметров опорного давления в однородном пласте и в пласте с непрочным прослойком показывает, что наличие прослойка увеличивает максимум опорного давления впереди очистной выработки на 33,4 % и на 14,2 % ширину предельно напряжённой зоны.

На рис. 5 представлены результаты сравнительного анализа проведённых исследований

по влиянию ширины очистной выработки на параметры опорного давления в окрестности очистной выработки для двух вариантов состояния пласта. В первом варианте пласт неоднородный и вмещает непрочный прослойк. Во втором варианте угольный пласт однороден.

На рис. 5а построены два графика зависимости максимума опорного давления впереди очистной выработки от размера её ширины a_v . График 1 построен для первого варианта, при котором в предельно напряжённое состояние переходит сначала непрочный прослойк, а затем и угольный пласт. График 2 соответствует варианту однородного пласта. Из рисунка видно, что графики имеют вид пологих кривых, градиент роста графика 1 выше, чем графика 2, и при $a_v = 45$ м он на треть превышает ординату второго.

На рис. 5б построены два графика изменения размеров предельно напряжённых зон впереди очистной выработки от размера её ширины. График 1 показывает изменение предельно напряжённой зоны (L_{ps}) для первого варианта, когда пласт вмещает непрочный прослойк. График 2 показывает изменение предельно напряжённой зоны (L_p) в однородном пласте. Из рисунка следует, что графики представляют собой вид слабовыпуклых эквидистантных кривых, ординаты которых в среднем отличаются друг от друга на 17 %.

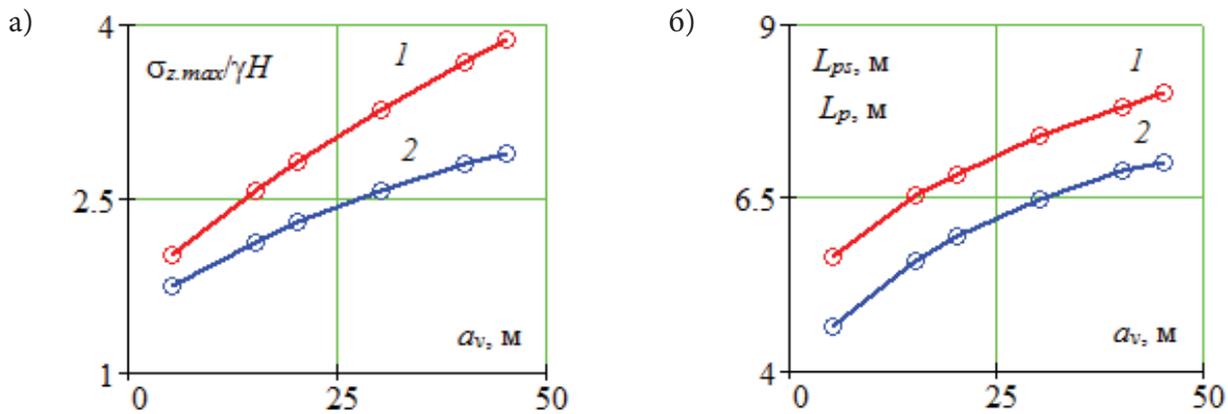


Рис. 5. Графики зависимости максимума опорного давления (а) и ширины предельно напряжённой зоны пласта в очистной выработке в зависимости от её ширины (б). Кривая 1 соответствует пласту с прослойком, кривая 2 — однородному пласту.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие в угольном пласте непрочного прослойка усложняет постановку и решение задачи об исследовании напряжённо-деформированного состояния как обрабатываемого очистной выработкой угольного пласта, так и углепородного массива. В этом случае приходится формулировать условия перехода в предельное состояние не только прослойка, но и самого пласта, и это обстоятельство приводит к дополнительным участкам интегрирования граничного интегрального уравнения.

Анализ полученных результатов показал:

а) изменения параметров опорного давления впереди очистной выработки с ростом её ширины носит характер плавных выпуклых кривых;

в) параметры опорного давления в пласте с прослойком впереди очистной выработки существенно выше, чем при отработке однородного пласта, и с ростом ширины выработки разница в этих параметрах увеличивается. Так, при ширине выработки 45 м размер предельно напряжённой зоны впереди очистной выработки на 14 %, а максимум опорного давления почти на 33 % выше, чем в однородном пласте.

Увеличение параметров опорного давления пласта при наличии непрочного прослойка следует учитывать при анализе газодинамической обстановки. Поскольку с увеличением размера предельно напряжённой зоны, в которой в основном и происходят газодинамические явления, в этом случае существенно возрастает и риск резкого повышения концентрации метана, а также внезапных выбросов угля и газа из забоя.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0001 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений» (рег. № АА-АА-А21-121012290020-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Христианович С. А. О волне дробления // Известия АН СССР. ОНТ. 1953. № 12. С. 1689–1699.
2. Христианович С. А. О волне выброса // Известия АН СССР. ОНТ. 1953. № 12. С. 1679–1688.

3. Фисенко Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
4. Ходот В. В. Внезапные выбросы угля и газа. М.: ГосНГИ, 1961. 363 с.
5. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. Л.: Недра, 1989. 488 с.
6. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
7. Зыков В. С. О механизме формирования выбросоопасной ситуации в очистном забое угольной шахты // Маркшейдерский вестник. 2016. № 5 (114). С. 44–48.
8. 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.
9. Guo H., Yuan L. An integrated approach to study of strata behaviour and gas flow dynamics and its application // Int. J. Coal Sci. & Technol. 2015. No. 2. P. 12–21.
10. Zhao B., Wen G., Sun H., et al. Similarity criteria and coal-like material in coal and gas outburst physical simulation // Int. J. Coal Sci. & Technol. 2018. Vol. 5. Iss. 2. P. 167–178.
11. 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.
12. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.
13. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1984. 382 с.
14. 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.
15. 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.
16. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
17. Gao W. Study on the width of the non-elastic zone in inclined coal pillar for strip mining // Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. 2014. No. 72. P. 304–310.
18. Galindo R. A., Serrano A., Olalla C. Ultimate bearing capacity of rock masses based of modified Mohr — Coulomb strength criterion // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2017. Vol. 93. P. 215–225.
19. Лурье А. И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
20. Партон В. З., Перлин П. И. Методы математической теории упругости. М.: Наука, 1981. 688 с.
21. Черданцев Н. В., Шаламанов В. А. Граничные интегральные уравнения в задачах механики подземных сооружений // Известия вузов «Горный журнал». 2004. № 5. С. 50–54.
22. 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.
23. Черданцев Н. В., Федорин В. А. Геомеханическое состояние массива горных пород с поверхностями ослабления в окрестности комплекса протяжённых горизонтальных выработок // Вестник КузГТУ. 2006. № 1 (52). С. 17–19.
24. 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.
25. Черданцев Н. В. Зоны нарушения сплошности в области сопряжения двух выработок квадратного поперечного сечения // Вестник КузГТУ. 2003. № 5 (36). С. 19–21.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.45.97.002

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

CALCULATION OF THE REFERENCE PRESSURE ON THE COAL SEAM WITH A WEAK LAYER WORKED OUT BY THE MINING WORKS

The problem of the stressed state of the coal-bearing massif containing the coal seam, worked out by the treatment mining, belongs to the class of flat elastically plastic tasks. The Coulomb-Mora criteria for the transition of the formation to the limit state, as well as the methods of bulk medium mechanics developed by Sokolovsky, were used to construct the stress field in the marginal stress zone of the formation. If there is a weak layer in the coal bed, the limit state occurs first in it, and then at some distance from its edge and in the bed. It occurs when the reduced stress in the layer reaches the value of the reduced stress in the formation corresponding to its uniaxial compression strength. After that, the formation and interlayers work together. Based on the constructed stress field of the formation, the problem of the stressed state of the massif is reduced to the problem of the theory of elasticity and is solved by the method of boundary elements and successive approximations. Based on the results of the computational experiment, the parameters of the reference pressure of the worked formation were obtained depending on the width of the working. Comparative estimates are given with similar parameters in the development of a homogeneous formation.

Keywords: ROCK MASSIF, COAL BED, WEAK INTERLAYERS MINING, STRENGTH CHARACTERISTICS, EXTREME STRESS ZONES, SLIDING LINES, BOUNDARY ELEMENT METHOD.

REFERENCES

1. Khristianovich S. A. About the crushing wave // News of the USSR Academy of Sciences. ONT. 1953. No. 12. P. 1689–1699. [In Russ.].
2. Khristianovich S. A. About the emission wave // News of the USSR Academy of Sciences. ONT. 1953. No. 12. P. 1679–1688. [In Russ.].
3. Fisenko G. L. Limiting conditions of rocks around workings. M.: Nedra, 1976. 272 p. [In Russ.].
4. Khodot V. V. Sudden emissions of coal and gas. Moscow: GosNITI, 1961. 363 p. [In Russ.].
5. Turchaninov I. A., Iofis M. A., Kasparyan E. V. Fundamentals of rock mechanics. L.: Nedra, 1989. 488 p. [In Russ.].
6. Petukhov I. M., Linkov A. M. Mechanics of rock impacts and emissions. M.: Nedra, 1983. 280 p. [In Russ.].
7. Zykov V. S. On the mechanism of formation of an explosive situation in the treatment face of a coal mine // Surveying Bulletin [Marksheyderskiy vestnik]. 2016. No. 5 (114). P. 44–48. [In Russ.].
8. 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.
9. Guo H., Yuan L. An integrated approach to study of strata behaviour and gas flow dynamics and its application // Int. J. Coal Sci. & Technol. 2015. No. 2. P. 12–21.
10. Zhao B., Wen G., Sun H., et al. Similarity criteria and coal-like material in coal and gas outburst physical simulation // Int. J. Coal Sci. & Technol. 2018. Vol. 5. Iss. 2. P. 167–178.

11. Cherdantsev N. V. On one approach to constructing a solution to the problem of coal and methane emission from the marginal zone of the formation // Applied Mathematics and Mechanics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 2023. No. 1. P. 81–111. [In Russ.].
12. Borisov A. A. Mechanics of rocks and massifs. M.: Nedra, 1980. 360 p. [In Russ.].
13. Bulychev N. S. Mechanics of underground structures. M.: Nedra, 1984. 382 p. [In Russ.].
14. Cherdantsev N. V. One of the approaches to constructing the trajectory of a hydraulic fracturing crack in a rock massif near a mining operation // Applied Mathematics and Mechanics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 2020. No. 2. P. 208–233. [In Russ.].
15. Cherdantsev N. V. Investigation of the extremely stressed state of the formation in its marginal zone by methods of mechanics of a loose medium // Mining information and analytical Bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2020. No. 3. P. 45–57. [In Russ.].
16. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с. [In Russ.].
17. Gao W. Study on the width of the non-elastic zone in inclined coal pillar for strip mining // Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. 2014. No. 72. P. 304–310.
18. Galindo R.A., Serrano A., Olalla C. Ultimate bearing capacity of rock masses based of modified Mohr – Coulomb strength criterion // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2017. Vol. 93. P. 215–225.
19. Lurie A. I. Theory of elasticity. M.: Nauka, 1970. 940 p. [In Russ.].
20. Parton V. Z., Perlin P. I. Methods of mathematical theory of elasticity. M.: Nauka, 1981. 688 p. [In Russ.].
21. Cherdantsev N. V., Shalamanov V. A. Boundary integral equations in problems of mechanics of underground structures // News of universities «Mining Journal» [Izvestiya vuzov «Gornyy zhurnal»]. 2004. No. 5. P. 50–54. [In Russ.].
22. Cherdantsev N. V., Presler V. T., Izakson V. Yu. Classification of cutouts according to the degree of their influence on the surrounding array // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2006. No. 5. P. 3–7. [In Russ.].
23. Cherdantsev N. V., Fedorin V. A. Geomechanical state of a rock mass with attenuation surfaces in the vicinity of a complex of extended horizontal workings // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2006. No. 1 (52). P. 17–19. [In Russ.].
24. 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 and Analytical Bulletin [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten]. 2009. No. 57. P. 122–125. [In Russ.].
25. Cherdantsev N. V. Zones of continuity violation in the area of interface of two workings of square cross-section // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2003. No. 5 (36). P. 19–21. [In Russ.].