

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.11.82.003

УДК 622.023.23

© Н.В. Черданцев, 2024

**Н.В. ЧЕРДАНЦЕВ**

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



## ПАРАМЕТРЫ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ОКОЛО ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКИ С ДВУМЯ ВАРИАНТАМИ УЧЁТА СВОЙСТВ ОБРУШЕННЫХ ПОРОД

*Результаты расчёта параметров опорного давления в предельно напряжённой зоне пласта в окрестности очистной выработки получены в рамках разработанной ранее модели геомеханического состояния анизотропного по прочности массива, вмещающего угольный пласт и пройденную по нему выработку.*

*Модель базируется на фундаментальных методах теории предельного состояния горных пород и граничных интегральных уравнений краевой задачи теории упругости.*

*Приведены сравнительные оценки для двух вариантов учёта механических характеристик слоя обрушенных пород. В одном варианте обрушенные породы представляют несвязную, абсолютно сыпучую среду, в другом — обрушенные породы слоя обладают меньшей, чем у пласта прочностью. И в предельно напряжённой зоне пласта, и предельной зоне слоя обрушенных пород распределение напряжений получено методом характеристик, разработанным В. В. Соколовским применительно к сыпучей среде. Переход к краевой задаче теории упругости осуществлён заменой предельно напряжённых зон пласта и слоя обрушенных пород действующими по контуру выработки и предельно напряжённых зон напряжениями.*

**Ключевые слова:** МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ГОРНАЯ ВЫРАБОТКА, ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫЕ ЗОНЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ, КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ КУЛОНА – МОРА, КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ТЕОРИИ УПРУГОСТИ.

### ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и эксплуатации угледобывающего предприятия важнейшим этапом работ является геомеханическое обоснование принятых как проектных, так и текущих производственно-технических решений, в первую очередь, направленных на обеспечение безопасности ведения горных работ.

Хорошо известно, что при подготовке и отработке угольных месторождений подземным способом наибольшую проблему представляют внезапные газовыделения, часто сопровождающиеся выбросами угля и газа, сдерживающие темпы добычи угля

и существенно снижающие производительность труда [1–7].

Как правило, внезапные выбросы угля и газа обусловлены двумя важнейшими факторами: горным (опорным) давлением на краевую часть пласта и давлением метана, нарастающим вглубь пласта [1–6, 8]. Опорное давление характеризуется следующими параметрами: максимумом опорного давления (максимального вертикального напряжения действующего в краевой зоне пласта) и шириной предельно напряжённой зоны.

В этой связи в задаче расчёта напряжённого состояния вмещающего массива, в том

числе и определения параметров опорного давления краевой зоны пласта, в которой в основном и происходят газодинамические явления, необходимо учитывать наиболее полный объём исходной информации о физико-механических свойствах углепородного массива, включая и характеристики обрушенных пород. Результаты решения этой задачи должны адекватно отражать газгеомеханическое состояние массива в окрестности ведения горных работ [1–6].

Целью представленной статьи является проведение вычислительного эксперимента в рамках разработанной ранее модели геомеханического состояния углепородного массива, вмещающего угольный пласт и очистную выработку [9]. При этом основное внимание уделяется механическим характеристикам обрушенных пород позади очистной выработки. На основе полученных результатов проведён сравнительный анализ параметров опорного давления в окрестности очистной выработки по двум вариантам. В первом варианте породы слоя обрушенных пород позади очистной выработки представляют сыпучую среду, у которой отсутствует связность (коэффициент сцепления равен нулю), а угол внутреннего трения такой же, как и на контакте с окружающим массивом. Во втором варианте углы внутреннего трения слоя обрушенных пород и пласта одинаковы, как одинаковы углы внутреннего трения по контакту пласта и слоя с окружающим массивом. Слой обладает остаточной прочностью, и его коэффициент сцепления не равен нулю.

В используемой модели учтены характеристики прочности не только угольного пласта, которые значительно ниже характеристик прочности пород вмещающего массива, но и характеристики прочности по контакту его с массивом. В этой связи реализуются общий и специальный критерии прочности Кулона–Мора, а в краевых частях пласта образуются предельно напряжённые зоны неупругого деформирования (зоны пластичности) [10–13].

В модели также учтено влияние обрушенных пород позади очистной выработки горных пород в предположении, что эти породы не

теряют полностью связности (их коэффициент сцепления не равен нулю, хотя и значительно меньше, чем в породах до обрушения). Т. е. обрушенные породы образуют слой, в котором его свойства близки к сильно нарушенным горным породам нетронутого массива и, следовательно, к анализу напряжённого состояния массива могут быть применены методы механики твёрдого тела [11, 13].

Следует отметить, что к характеристикам прочности горной породы относятся коэффициент сцепления или предел прочности на одноосное сжатие, и угол внутреннего трения. Величина коэффициента сцепления сильно зависит от типа горной породы и для каждого отдельного случая принимает своё конкретное значение.

Коэффициент сцепления по контакту слоёв или в общем случае по поверхностям ослаблений, как правило, ниже, чем по пласту или монолитной породе. Для большинства типов поверхностей ослабления, к которым относятся и тектонические нарушения,  $K$  меняется от нуля до 0,2 МПа [3].

Угол внутреннего трения более стабильная характеристика. Так, например, для большинства типов песчаных пород (монолитных или ослабленных) угол  $\rho$  изменяется в пределах  $30^\circ$ – $39^\circ$ , а в песчано-глинистых породах и угольных пластах  $\rho$  колеблется в интервале  $20^\circ$ – $25^\circ$ . По контактам слоёв  $\rho = 9^\circ$ – $20^\circ$  [3].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача формулируется следующим образом (рис. 1). В массиве горных пород, нагруженном равнокомпонентным гравитационным давлением  $\gamma H$  ( $\gamma$  — средневзвешенный объёмный вес пород), на глубине  $H$  расположен угольный пласт 1 мощностью  $t$ . Его отрабатывает на всю мощность очистная выработка 2 прямоугольного сечения размерами  $a \times h$  механизированным комплексом 3. Система координат  $0yz$  расположена в центре тяжести поперечного сечения очистной выработки. Размеры выработки вдоль оси  $x$  значительно превосходят их размеры в плоскости  $0yz$ , поэтому породы в окрестности выработки находятся в условиях плоской деформации.

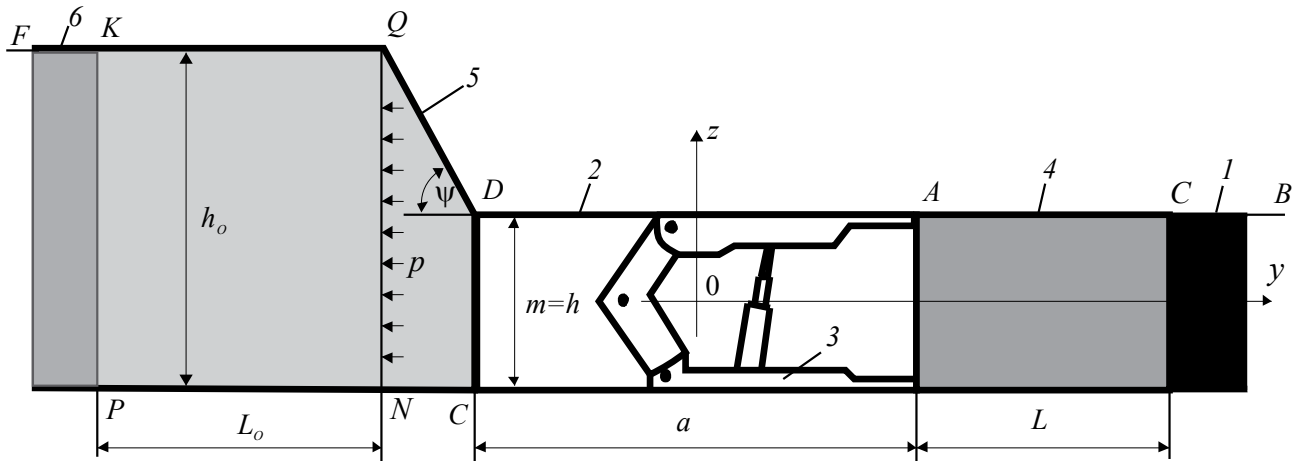


Рис. 1. Расчётная схема задачи

Характеристики прочности угольного пласта:  $\sigma_0$  — предел прочности на одноосное сжатие,  $K$  — коэффициент сцепления,  $\rho$  — угол внутреннего трения. Характеристики на контакте пласта с остальным массивом:  $\sigma'_0$  — предел прочности на сжатие,  $K'$  — коэффициент сцепления,  $\rho'$  — угол внутреннего трения.

Впереди очистной выработки краевая часть угольного пласта 4 шириной  $L$  находится в предельно напряжённом состоянии. Позади очистной выработки после выемки угля образуется слой массива обрушившейся сверху породы. Он представляет собой структурно ослабленную среду. Часть этого слоя 6 длиной  $L_0$  находится в предельно напряжённом состоянии, а часть 6, расположенная левее линии  $KP$ , переходит в упругое состояние. Характеристики прочности слоя: предел прочности  $\sigma_s$  и коэффициент сцепления  $K_s$ , а характеристики прочности на его контакте с массивом  $\sigma'_s$ ,  $K'_s$ . Угол внутреннего трения  $\rho_s$  превышает значение угла внутреннего трения  $\rho'_s$  по его контакту с массивом.

Обрушение пород начинается от кровли выработки и распространяется вглубь массива под углом  $\psi$  к горизонту (рис. 1). Для большинства угольных месторождений этот угол в среднем составляет  $50^\circ$  [3, 4]. Максимальная мощность слоя обрушенных пород  $h_0$  определяется условиями подбучивания, при которых верхние слои получают опору на обрушенные породы, препятствующие их смещению. Мощность слоя зависит от

физико-механических свойств пород кровли пласта и вычисляется по формуле [3, 4]

$$h_0 = \frac{m}{k_p - 1},$$

где  $k_p$  — коэффициент разрыхления разрушенных пород. Он принимается в пределах 1,1–1,3. Причём у более прочных пород коэффициент разрыхления выше.

Особенность задачи о напряжённом состоянии массива с пластовой выработкой заключается в том, что прочность окружающих горных пород, как правило, существенно выше прочности пласта, по которому пройдена выработка. Так, предел прочности пород кровли  $\sigma_k$  может достигать 100 МПа и выше. Поэтому если эти породы деформируются ещё упруго, то краевые части пласта шириной  $L$  уже находятся в предельном состоянии.

Предельно напряжённые зоны пласта начинают развиваться с его обнажения в бортах выработки при достижении вертикальным главным напряжением  $\sigma_1$  (главное напряжение  $\sigma_3$  на обнажении равно нулю) значения  $\sigma_0$ . При увеличении  $\sigma_1$  зона неупругих деформаций распространяется вглубь пласта, и в этой зоне он деформируется не только по направлению его мощности, но, главным образом, в плоскости контактов между пластом и окружающими породами. Поскольку вдоль контактов пласта с окружающими породами возможно нарушение сплошности, проявляющееся в виде проскальзывания, то

в нём будут одновременно существовать два предельных состояния равновесия: общее или обыкновенное (состояние самого пласта) и специальное (состояние по контакту пласта с окружающим массивом) [3, 10–12].

В этой связи в строгой математической постановке задачи необходимо использовать два критерия перехода его в предельное состояние: общий и специальный. Эти критерии чаще всего применяются, когда огибающие кругов предельных состояний по пласту и по поверхностям ослаблений (по контакту пласта с массивом) прямолинейны [3, 10, 12]. Совместно с дифференциальными уравнениями равновесия они образуют систему нелинейных уравнений относительно приведённого напряжения  $\sigma$  и угла  $\varphi$  между главным напряжением  $\sigma_1$  и осью абсцисс  $y$ . Она сводится к дифференциальному уравнению, принадлежащему к гиперболическому типу уравнений. Интегрирование таких уравнений производится методом характеристик (характеристических линий), на которых вид уравнений значительно упрощается [10].

Несмотря на относительно простой вид полученных дифференциальных уравнений, их интегрирование в замкнутом виде получается лишь в ряде некоторых частных случаев. В общем случае решение может быть получено только численным методом путём замены дифференциальных уравнений рекуррентными конечно-разностными выражениями. В зависимости от условий на границах участков вычислительная процедура сводится к последовательному решению трёх краевых задач механики предельного равновесия сыпучих сред для ряда характерных участков этой области [3, 10, 12].

Зная характер распределения линий скольжения и напряжений на них, можно определить напряжения в любой точке предельно напряжённой зоны пласта, в том числе и на границе (контакте) пласта с окружающим массивом. В этой связи замена краевой части пласта, находящейся в предельном состоянии, действующими на контакте пласта с массивом нормальными и касательными напряжениями позволяет сформулированную

задачу свести к краевой задаче теории упругости. В отличие от классической задачи граничные условия формулируются не только по контуру выработки, а по всему замкнутому контуру, включающему кровлю, почву выработки и контакт пласта с окружающим массивом на участке предельной зоны.

Следует отметить, что при равенстве углов внутреннего трения пласта (слоя обрушенных пород) и на его контакте с окружающим массивом выполняется только общий критерий Кулона–Мора, поэтому эпюры напряжений вдоль контакта пласта с массивом изменяются монотонно и в задаче теории упругости их проще всего аппроксимировать экспонентами [8]. Если угол внутреннего трения внутреннего трения по контакту пласта с окружающим массивом не совпадает с углом внутреннего трения самого пласта, то в предельно напряжённой зоне реализуются оба критерия Кулона–Мора (общий и специальный). В этом случае эпюры напряжений вдоль контакта пласта имеют вид ступенчато возрастающих графиков, которые также следует аппроксимировать монотонными функциями в виде полиномов, степень которых зависит от протяжённости предельно напряжённой зоны [12, 13].

## РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И ИХ АНАЛИЗ

Ниже приведены результаты расчёта параметров опорного давления в окрестности очистной выработки, полученные при вариантах состояния слоя обрушенных пород. Размеры выработки и характеристики угольного пласта фиксированы. В качестве исходной информации приняты следующие общие данные для обоих вариантов:  $H = 600$  м,  $\gamma = 25$  кН/м<sup>3</sup>,  $\sigma_0 = 10$  МПа,  $\sigma'_0 = 0$ ,  $\rho = 20^\circ$ ,  $\rho' = 10^\circ$ ,  $h = m = 3$  м,  $a = 20$  м,  $\gamma_s = 20$  кН/м<sup>3</sup>,  $\rho_k = \rho_s$ ,  $\psi = 50^\circ$ ,  $k_p = 1,2$ .

Кроме этих общих данных для каждого варианта приняты дополнительные данные.

Вариант 1. Слой обрушенных пород является сыпучим не связным материалом средней:  $\sigma_s = \sigma'_s = 0$ ,  $\rho_s = \rho'_s$ ,  $\rho_s = 20^\circ$ ,  $\rho_s = 25^\circ$ ,  $\rho_s = 30^\circ$ ,  $\rho_s = 35^\circ$ .

Вариант 2. Слой обрушенных пород обладает связностью:  $\sigma_s = (5-8)$  МПа,  $\sigma'_s = 0$ ,  $\rho_s = \rho$ ,  $\rho'_s = \rho'$ .

Как видно из дополнительных данных, в первом варианте изменяется угол внутреннего трения слоя обрушенных пород, а во втором варианте изменяется предел прочности (остаточной прочности) этого слоя.

Известно, что в несвязной сыпучей среде возникают силы бокового давления интенсивностью  $p$  (на рис. 1 распределены вдоль линии  $NQ$ ), определяемые по известной формуле [3]

$$p = \xi \cdot p_b = \xi \cdot \gamma_c h_0, \quad (1)$$

где  $\xi$  — коэффициент бокового давления, определяется следующим образом [3]:

$$\xi = \frac{1 - \sin \rho_s}{1 + \sin \rho_s},$$

а  $\gamma_c$  — объёмный вес обрушенной породы здесь принят равным  $20$  кН/м<sup>3</sup>.

В связной среде силы бокового давления (1) в предельной зоне не учитываются.

На рис. 2 показана эпюра вертикальных нормальных напряжений  $\sigma_z$  (опорного давления) в кровле угольного пласта вдоль линии  $ACB$  (рис. 1). На рис. 3 эпюра  $\sigma_z$  построена вдоль кровли слоя обрушенных пород (вдоль линии  $QKF$  на рис. 1). Они относятся к первому варианту состояния слоя обрушенных пород и построены при  $\rho_s = 30^\circ$ . Цифрой 1 обозначена часть эпюры в предельно напряжённой части пласта (слоя), цифрой 2 — в их упругих областях.

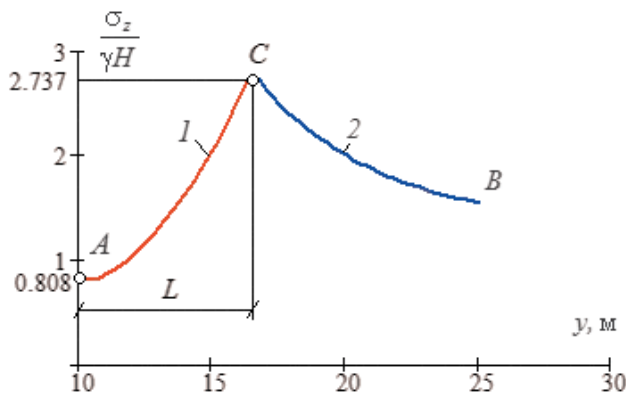


Рис. 2. Эпюра опорного давления в кровле угольного пласта по варианту 1

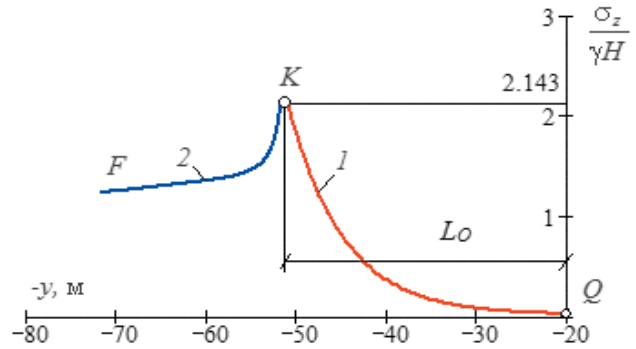


Рис. 3. Эпюра опорного давления в кровле слоя обрушенных пород по варианту 1

По результатам вычислений получились следующие параметры опорного давления. В угольном пласте:  $\sigma_{z,max} = 2,737 \gamma H$ ,  $L = 6,55$  м. В слое обрушенных пород:  $\sigma_{z,max} = 2,143 \gamma H$ ,  $L_0 = 31,2$  м. Из сравнения параметров следует, что опорное давление в пласте на 21,7% выше, чем в обрушенных породах, однако протяжённость предельно напряжённой зоны в слое обрушенных пород в 4,67 раза превышает аналогичную зону в угольном пласте.

На рис. 4, 5 приведены аналогичные эпюры вертикальных нормальных напряжений  $\sigma_z$ , аналогичные эпюрам на рис. 2, 3, в кровлях угольного пласта вдоль и слоя обрушенных пород для второго варианта. Они построены при  $\sigma_s = 5$  МПа. В этом варианте параметры опорного давления получились следующими. В угольном пласте  $\sigma_{z,max} = 2,585 \gamma H$ ;  $L = 6,25$  м. В слое обрушенных пород  $\sigma_{z,max} = 1,659 \gamma H$ ;  $L_0 = 36$  м. В этом варианте максимум опорного давления в пласте на 35,82% выше, чем в обрушенных породах, а ширина предельно напряжённой зоны в слое в 5,76 раза превышает аналогичную зону в пласте.

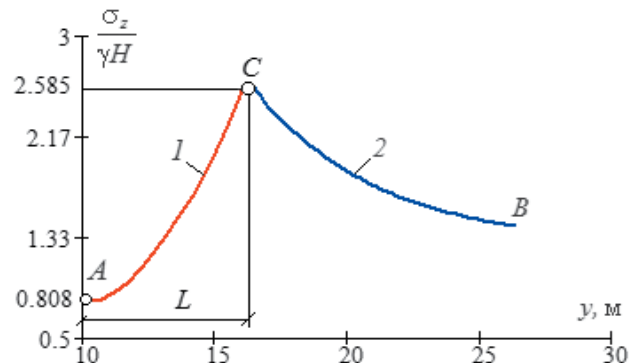


Рис. 4. Эпюра опорного давления в кровле угольного пласта по варианту 2

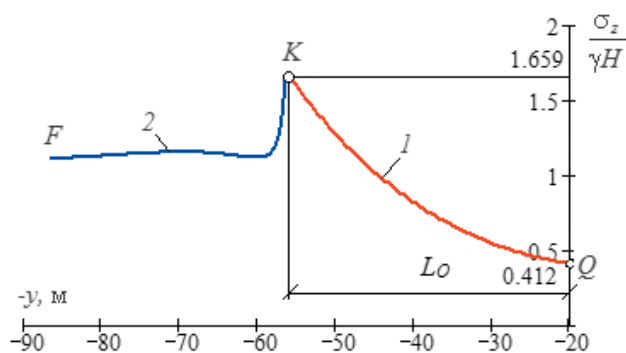


Рис. 5. Эпюра опорного давления в кровле слоя обрушенных пород по варианту 2

На рис. 6а показан график зависимости одного из параметров опорного давления в краевой зоне пласта — максимального вертикального напряжения  $\sigma_{z,max}$  (в долях от  $\gamma H$ ) от угла внутреннего трения обрушенных пород по варианту 1. На графике 6б представлен график зависимости другого параметра опорного давления — ширины предельного

напряжённой зоны пласта также от угла внутреннего трения. На рис. 6в и 6г построены графики параметров опорного давления в слое обрушенных пород позади очистной выработки.

На рис. 7а и 7б показаны график зависимости параметров опорного давления в краевой зоне пласта от остаточной прочности обрушенных пород по варианту 2. На рис. 7в и 7г построены графики параметров опорного давления в слое обрушенных пород позади очистной выработки.

Из этих рисунков следует, что графики имеют вид слабовогнутых кривых (кроме графика на рис. 6в), близких к прямым линиям и убывающих с ростом аргумента.

Из сравнения параметров опорного давления в пласте и в слое обрушенных пород по двум вариантам следует, что лишь при достаточно слабой сыпучей среде (с незначительным углом внутреннего трения обрушенных пород) параметры опорного давления по двум

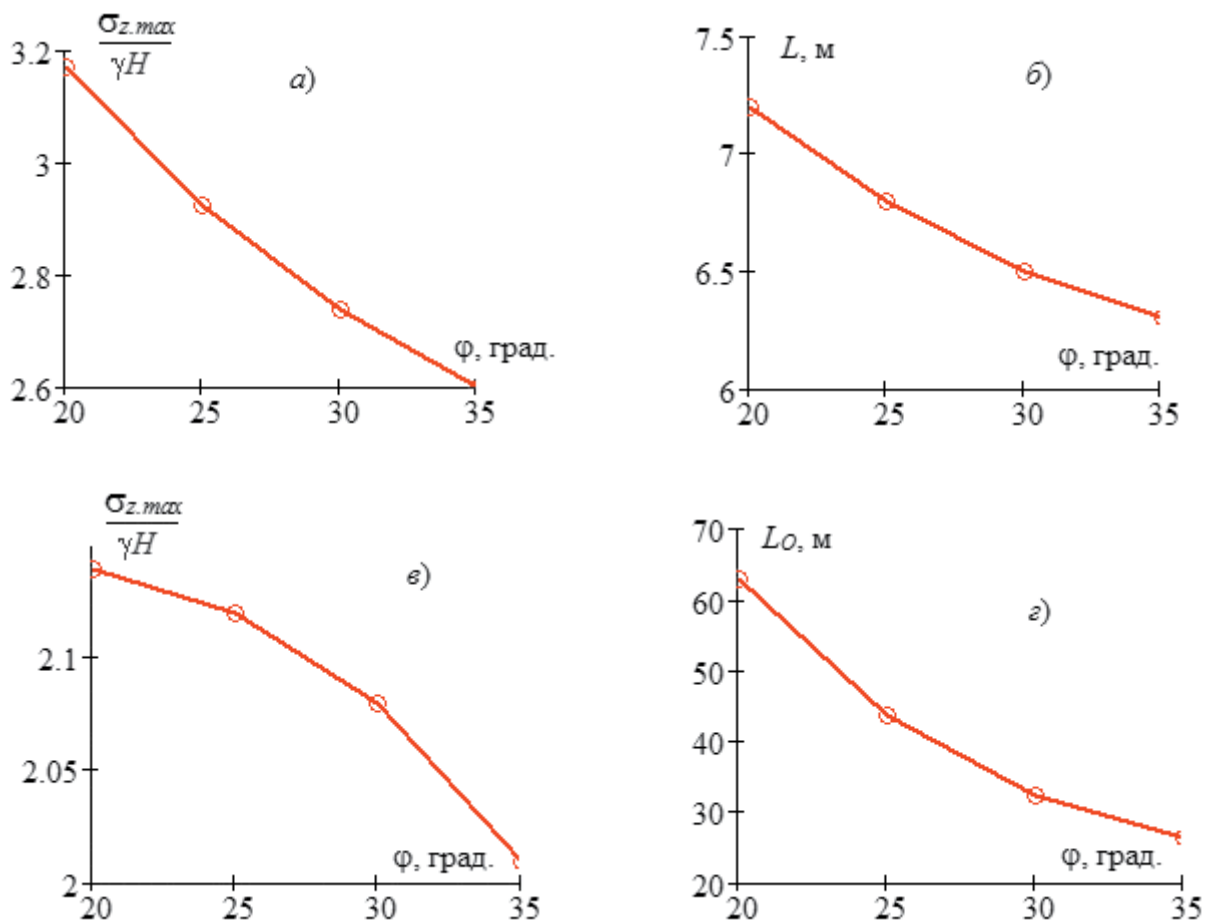


Рис. 6. Эпюра опорного давления в кровле слоя обрушенных пород по варианту 2

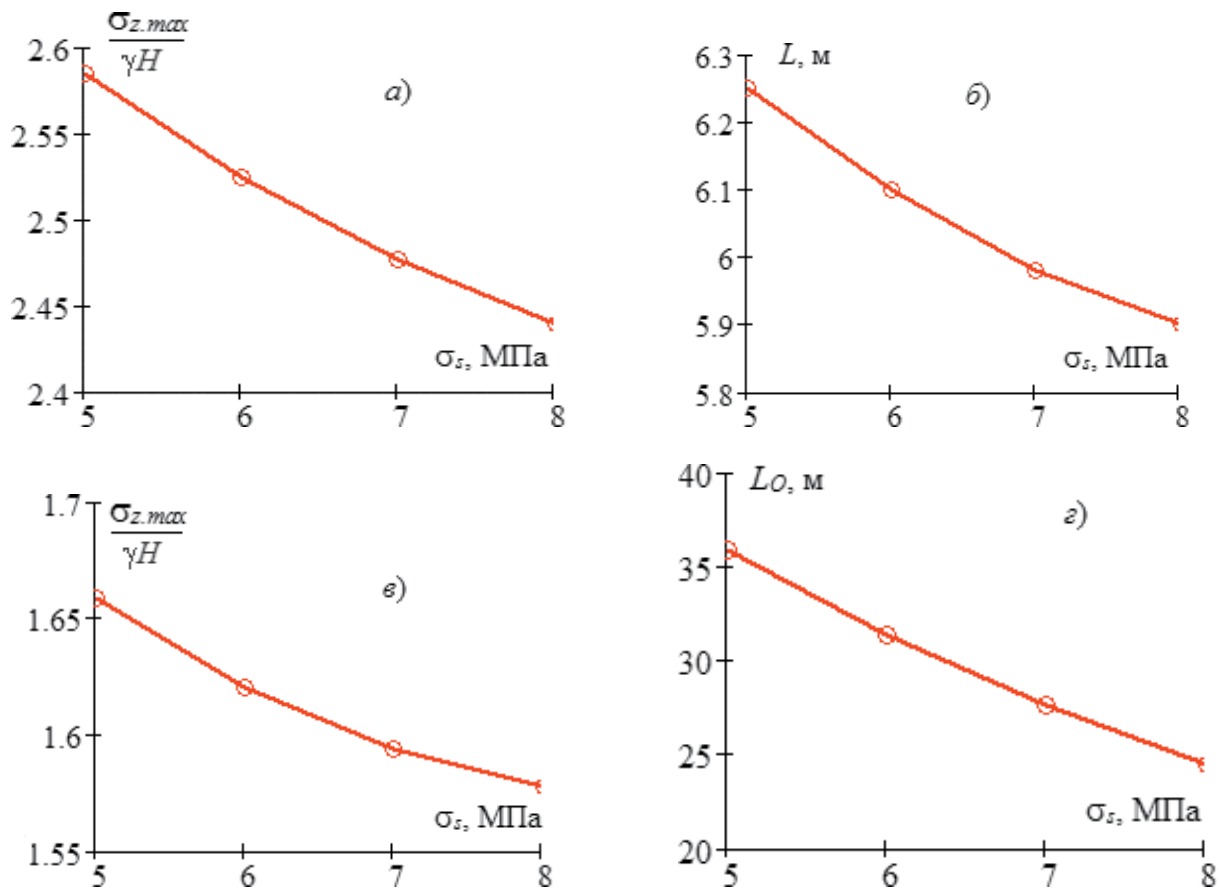


Рис. 7. Эпюра опорного давления в кровле слоя обрушенных пород по варианту 2

вариантам довольно значительно отличаются друг от друга. При других значениях разница между этими параметрами не так значительна. В этой связи необходимо детально изучать как физико-механические свойства пород нетронутого массива, так и обрушенных пород и по результатам их анализа выбирать для расчёта наиболее подходящий вариант.

Следует, однако, отметить, что считать обрушенные породы абсолютно сыпучей средой, не обладающей связностью, не совсем корректно, поскольку обрушенные породы имеют крупноблочную структуру, отличающиеся от мелкодисперсной структуры абсолютно сыпучей среды и, следовательно, обладают остаточной прочностью.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ значений параметров опорного давления в окрестности очистной выработки, полученных по двум вариантам, позволяет утверждать следующее. Во-первых, механические характеристики

обрушенных пород кровли пласта позади очистной выработки существенно влияют на параметры опорного давления и в краевой части пласта, и в слое обрушенных пород. Во-вторых, для получения более точных оценок о геомеханическом состоянии углеродного массива в области ведения очистных работ важно располагать достоверной информацией не только о свойствах нетронутого горными работами массива, но и физико-механических свойствах обрушенных пород.

*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. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
2. Чернов О. И., Пузырев В. Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. М.: Недра, 1979. 296 с.
3. Фисенко Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
4. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.
5. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. М.: Недра, 1989. 488 с.
6. Зыков В. С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах. Кемерово, 2010. 334 с.
7. 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.
8. Черданцев Н. В. Решение задачи о раскрытии метаном трещин в предельно напряжённой зоне пласта // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 2. С. 13–19.
9. Черданцев Н. В. Об одном варианте расчёта напряжённого состояния пласта, отработываемого очистной выработкой // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 8. С. 23–28.
10. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
11. Руппенейт К. В. Некоторые вопросы механики горных пород. М.: Углетехиздат, 1954. 384 с.
12. Черданцев Н. В. Исследование предельно напряжённого состояния пласта в его краевой зоне методами механики сыпучей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3. С. 45–57.
13. Черданцев Н. В. Оценка геомеханического состояния краевой зоны угольного пласта, вмещающего непрочный прослой // Прикладная математика и механика. 2021. № 2. С. 239–256.

---

DOI: 10.25558/VOSTNII.2024.11.82.003

UDC 622.023.23

© N. V. Cherdantsev, 2024

**N. V. CHERDANTSEV**

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: nvch2014@yandex.ru

## PARAMETERS OF THE REFERENCE PRESSURE NEAR THE MINE WITH TWO VERSIONS OF THE PROPERTIES OF THE COLLAPSED ROCKS

*The results of calculation of the parameters of the reference pressure in the extremely stressed zone of the formation in the vicinity of the treatment mine were obtained within the framework of the previously developed model of the geomechanical state of the anisotropic mass with respect to strength, containing the coal seam and the mining passed through it.*

*The model is based on fundamental methods of the theory of the limit state of rocks and boundary integral equations of the boundary problem of the theory of elasticity.*

*Comparative estimates are given for two options for taking into account the mechanical characteristics of the layer of collapsed rocks. In one embodiment, the collapsed rocks represent an unconnected, completely loose medium, in the other, the collapsed rocks of the layer have lower strength than that of the formation. Both in the extremely stressed zone of the formation and in the limit zone of the layer of*



*collapsed rocks, the stress distribution was obtained by the characterization method developed by V. V. Sokolovsky in relation to the bulk medium. The transition to the boundary problem of the elasticity theory was carried out by replacing the extremely stressed zones of the formation and the layer of collapsed rocks with stresses acting along the mining contour and the extremely stressed zones.*

Keywords: ROCK MASSIF, COAL BED, MINING, EXTREMELY STRESSED ZONES, STRENGTH CHARACTERISTICS, CRITERIA FOR THE STRENGTH OF THE COULOMB–MOHR, EDGE PROBLEM OF ELASTICITY THEORY.

## REFERENCES

1. Petukhov I. M., Linkov A. M. Mechanics of rock impacts and emissions. M.: Nedra, 1983. 280 p. [In Russ.].
2. Chernov O. I., Puzyrev V. N. Forecast of sudden emissions of coal and gas. M.: Nedra, 1979. 296 p. [In Russ.].
3. Fisenko G. L. Limiting conditions of rocks around workings. M.: Nedra, 1976. 272 p. [In Russ.].
4. Borisov A. A. Mechanics of rocks and massifs. M.: Nedra, 1980. 360 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. Zykov V. S. Sudden emissions of coal and gas and other gas-dynamic phenomena in mines. Kemerovo, 2010. 334 p. [In Russ.].
7. Shinkevich M. V., Kozyreva E. N., Plaksin M. S. and others Methodological foundations for predicting the dynamics of the methane abundance of the excavation site when working off powerful and converging strata with long columns // Bulletin of the Scientific Center for Safety of work in the coal industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2017. No. 3. P. 23–29. [In Russ.].
8. Cherdantsev N. V. Solving the problem of methane cracking in the extremely stressed zone of the formation // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2022. No. 2. P. 13–19. [In Russ.].
9. Cherdantsev N. V. On one variant of calculating the stress state of a formation worked out by a treatment mine // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2020. No. 8. P. 23–28. [In Russ.].
10. Sokolovsky V. V. Loose Medium Statics. M.: Nauka, 1990. 272 p. [In Russ.].
11. Ruppeneyt K. V. Some Questions of Rock Mechanics. M.: House of Coal, 1954. 384 p. [In Russ.].
12. 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.].
13. Cherdantsev N. V. Assessment of the geomechanical state of the marginal zone of a coal seam containing a fragile interlayer // Applied Mathematics and Mechanics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 2021. No. 2. P. 239–256. [In Russ.].