

# Ι ΓΕΟΜΕΧΑΗИΚΑ И ΓΕΟΤΕΧΗΟΛΟΓИЯ

#### DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.92.56.001

УДК 622.023.23 © Н.В. Черданцев, 2021

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



# ПАРАМЕТРЫ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В КРАЕВОЙ ЗОНЕ ПЛАСТА С НИЗКОПРОЧНЫМ ПРОСЛОЙКОМ, ОТРАБАТЫВАЕМОГО ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТКОЙ

Методами механики деформируемого твёрдого тела представлены результаты решения задачи о напряжённом состоянии краевой зоны угольного пласта, вмещающего «слабый» прослоек. В этой задаче сетка линий скольжения сначала начинает развиваться в предельно напряжённой зоне прослойка, но на некотором расстоянии от кромки пласта напряжения в прослойке возрастают и достигают предела прочности пласта. В результате в нём возникает линия скольжения, являющаяся продолжением линии скольжения в прослойке, которая служит граничной линией для сетки линий скольжения, распространяющейся и вглубь пласта.

Поле напряжений в предельно напряжённой зоне пласта, определяется методом характеристик, а в упругой области оно строится методом граничных интегральных уравнений.

Приведены сравнительные оценки параметров опорного давления, полученные из решения задачи на основе подхода о дискретном переходе в предельное состояние сначала прослойка, а потом пласта, и задачи, в которой характеристики прочности пласта и прослойка учитываются как средневзвешенные по мощности пласта. Показано, что результаты в двух подходах близки, но есть в них и принципиальные отличия.

Ключевые слова: УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ОЧИСТНАЯ ВЫРАБОТКА, ПРЕДЕЛЬНО НА-ПРЯЖЁННЫЕ ЗОНЫ, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ ПЛАСТА, ЛИНИИ СКОЛЬЖЕ-НИЯ, КРАЕВЫЕ ЗАДАЧИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ.

# ВВЕДЕНИЕ

Распределение напряжений во вмещающем угольный пласт и пластовую выработку массиве в значительной степени определяется распределением напряжений в краевой зоне угольного пласта, которая находится в предельно напряжённом состоянии, испытывая необратимые пластические деформации. Эта задача весьма актуальна, поскольку газодинамические явления, происходящие при ведении горных работ, в основном возникают в предельно напряжённых зонах. Процессы выброса угля и газа, горные удары, обильные газовыделения из забоев очистных и подготовительных выработок, а также проблемы устойчивости целиков, горных выработок, породных обнажений обусловлены напряжённым состоянием пласта и в большей степени зависят от распределения в нём поля напряжений [1–15].

Механизм формирования предельно напряжённых зон в угольном пласте с образованием линий скольжения подробно изложен в работах [5, 16, 17]. В них показано, что пре-

5

дельно 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 предела прочности пласта на одноосное сжатие.

Задачи о распределении напряжений в краевой зоне пласта при наличии в нём «слабого» прослойка изложены в работах [18, 19]. В этой статье определяются параметры опорного давления в пласте с низкопрочным прослойком при отработке пласта очистной выработкой.

В ходе решения задачи о напряжённом состоянии краевой части пласта определяются параметры опорного давления (максимальная величина вертикальной компоненты нормальных напряжений  $\sigma_z$  и размер предельно напряжённой зоны *L*) для ряда значений предела прочности прослойка и фиксированных значений мощности прослойка и прочности самого пласта.

# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЁ РЕШЕНИЕ

Задача формулируется следующим образом. В массиве горных пород имеется очистная выработка 1 прямоугольного поперечного сечения размерами  $b \times h$ , пройденная на глубине *H* по угольному пласту 2 на всю его мощность *m* (рис. 1).



Рис. 1. Расчётная схема задачи

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 прослоек мощностью  $h_s$  с низкими характеристиками прочности угля. Предел прочности слоя  $\sigma_{0s}$  значительно ниже, чем  $\sigma_0$ , а угол внутреннего трения  $\rho_s$  близок к значению  $\rho$ .

6

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 вглубь массива находится область упругого деформирования пласта 5. Система координат y0z совпадает с центральными осями выработки. Позади очистной выработки образуется слой обрушенных пород 6, 7. Высота этого слоя  $h_0$  определяется из соображения полного подбучивания налегающих на него пород. В данной задаче обрушенные породы считаются сыпучей средой, причём, часть слоя *б CDQKP* размером  $L_c$  находится в предельно напряжённой зоне, а другая часть 7, левее линии *KP*, деформируется упруго. Угол сдвижения горных пород  $\Psi$  в зоне ведения очистных работ принят равным 50° [5]. Углы внутреннего трения слоя обрушенных пород и на их контакте с окружающим массивом приняты одинаковыми и равными 25°, а коэффициент разрыхления составляет 1,2 [5–7].

В основе модели напряжённого состояния в краевой зоне структурно однородного угольного пласта, на базе которой разработана модель структурно неоднородного пласта с низкопрочным прослойком, лежат фундаментальные методы механики сыпучей среды, разработанные В.В. Соколовским [20]. Оценка же напряжённого состояния вмещающего углепородного массива в окрестности пластовых выработок с учётом распределения напряжений в угольном пласте производится на базе ранее разработанных моделей геомеханического состояния анизотропного массива с системой выработок, в которых поле напряжений находится из решения краевых задач теории упругости [20].

Как показано в работах [18, 19], 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 линий скольжения на границах характерных участков предельно напряжённой зоны показана на рис. 1 для верхней половины прослойка и пласта, расположенных над осью *у*. Линии скольжения имеют такой же вид, как и в структурно однородном пласте [16, 17].

Из рисунка следует, что предельное состояние в пласте возникает не на его кромке, лишь на некотором удалении от неё и при достижении приведённым напряжением [5, 16–19] в прослойке величины приведённого напряжения в пласте, соответствующего его пределу прочности при одноосном сжатии. Из соображений непрерывности приведённых напряжений и отсутствия разрывов в линиях скольжения в пласте и слое условия перехода пласта в предельное состояние принимают следующий вид:

$$\sigma_p = \sigma_s, \qquad \phi_p = \phi_s,$$

где  $\sigma_p$  — приведённое напряжение в пласте, соответствующее его пределу прочности;  $\sigma_s$  — приведённое напряжение в прослойке,  $\phi_p$  — угол наклона к горизонту напряжения  $\sigma_1$  в пласте,  $\phi_s$  — угол наклона  $\sigma_1$  в прослойке в точке *T*, расположенной на расстоянии  $L_p$  от обнажения пласта.

В кровле пласта и вдоль его оси эпюры напряжений имеют вид сменяющих друг друга постоянных и нелинейно возрастающих графиков. В исследованиях напряжённого состояния массива горных пород эти графики аппроксимируются аналитическими зависимостями в виде полиномов различной степени. Такая замена эпюр упрощает решение упругопластической задачи. Коэффициенты полинома определяются из решения системы алгебраических уравнений, число которых совпадает с количеством выбранных участков в предельно напряжённой зоне «слабого» слоя и самого пласта. Правые части, уравнений этой системы равны значениям найденных напряжений на границах этих участков [16].

Поставленная в статье задача о напряжённом состоянии массива горных пород, вмещающего угольный пласт с низко прочным прослойком, так же, как и задача с однородным пластом, относится к классу упругопластических задач и сводится ко второй внешней краевой задаче теории упругости [17–19].

Анализ напряжённого состояния краевой зоны пласта со «слабым» прослойком около очистной выработки и сравнительные оценки результатов с результатами ранее разработанных подходов [5] в этой статье излагаются впервые.

7

## РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И ИХ АНАЛИЗ

Вычислительный эксперимент проведён при следующих параметрах массива, выработки и пласта:  $H = 600 \text{ м}, \lambda = 1, \gamma = 25 \text{ кH/м}^3, \sigma_0 = 10 \text{ МПа}, \rho = 20^\circ, \rho_s = 20^\circ, \rho' = 10^\circ, K' = 0, b = 25 \text{ м}, h = 3 \text{ м}, h_s = 0,75 \text{ м}.$  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 низко прочный прослоек, предел прочности которого составляет  $\sigma_{0s} = 4,6$  МПа. Она построена по результатам численного решения трёх краевых задач механики предельного состояния твёрдого тела для ряда характерных участков прослойка и пласта и на рисунке представлена точками её узлов.



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

На рис. 3 построены два графика зависимости напряжения σ<sub>2</sub> от координаты *у*.



Рис. 3. Аппроксимация эпюры напряжений оz (1) полиномом шестой степени (2)

На рис. 3 график 1 — эпюра вертикального напряжения  $\sigma_z$  вдоль кровли прослойка и пласта в предельно напряжённой зоне на расстоянии 10 м от забоя выработки. На

8

графике показана точка Т, принадлежащая прослойку, где начинается переход пласта в предельно напряжённое состояние. Правее точки Т часть графика соответствует совместному предельному деформированию пласта и прослойка. На рисунке видно, что левее и правее точки Т эпюра имеет вид попеременно сменяющих горизонтальных и нелинейно возрастающих участков, а в самой точке эпюра имеет скачок (разрыв), связанный с резким изменением характеристик прочности пласта и прослойка. Из графика следует, что размер предельно напряжённой зоны прослойка, при котором пласт переходит в предельное состояние, равен 1,29 м (13,79 м – *b*/2), а величина вертикального напряжения при этом составляет 0,97 үН. График 2 является аппроксимирующим, график 1 — полиномом шестой степени.

На рис. 4-6 представлены результаты решения упругопластической задачи.

На рис. 4 построена модель выработки, предельно напряжённые зоны пласта и слоя обрушенных пород позади выработки.



Рис. 4. Компьютерная модель выработки, предельно напряжённой зоны пласта и слоя обрушенных пород позади очистной выработки

На рис. 5 показана эпюра нормальных напряжений σ, построенная вдоль кровли пласта (вдоль линии ARB на рис. 1, 4). Кривая 1 является эпюрой напряжений в предельно напряжённой зоне пласта, а кривая 2 — эпюрой напряжений в его упругой области. Их значения совпадают в точке R, соответствующей границе раздела упругой и предельно напряжённой зон. Из рисунка следует, что максимальное нормальное напряжение  $\sigma_{z max}$ , действующее в точке *R* и являющееся одним из параметров опорного давления в окрестности выработки, составляет 3,13 үН. Ширина предельно напряжённой зоны равна 7,02 м. Для сравнения в однородном пласте без прослойка максимум опорного давления составляет 3,04 үН, а его ширина предельно напряжённой зоны равна 7,22 м. Видно, что максимум опорного давления в пласте с прослойком больше, а ширина предельно напряжённой зоны меньше аналогичных параметров для однородного пласта.



Рис. 5. Эпюра напряжений <br/>  $\sigma_z$ вдоль кровли пласта (вдоль линии ARB рис. 1, 4)

На рис. 6 построена эпюра напряжений  $\sigma_z$  в зоне обрушенных пород. Кривая 1 этой эпюры соответствует напряжениям в предельно напряжённой зоне слоя обрушенных пород, а кривая 2 — в упругой области слоя. На рис. 6 указаны максимум опорного давления, который составляет 2,22  $\gamma H$ , и ширина предельно напряжённой зоны, составляющая 44 м.



Рис. 6. Эпюра напряжений  $\sigma_z$  вдоль кровли слоя обрушенных пород (вдоль линии *QKF* рис. 1, 4)

На рис. 7, 8 представлены результаты расчёта параметров опорного давления для ряда значений предела прочности прослойка на основе подхода о раздельном наступлении предельного состояния сначала в прослойке, а затем в пласте. Для сравнения приведены результаты расчёта этих параметров для пласта с прослойком на основе подхода об его средневзвешенной прочности  $\sigma_c$ , в котором его средневзвешенная прочность вычисляет-ся по формуле [5]:

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

9

На рис. 7 построены графики зависимости максимума опорного давления в пласте от предела прочности прослойка. График 1 построен по представленному в статье подходу, а график 2 по результатам расчёта пласта с прослойком, в котором предел прочности определён по формуле для средневзвешенной прочности.



Рис. 7. Графики зависимости максимума опорного давления от предела прочности прослойка

На рисунке видно, что график 1 с увеличением прочности прослойка убывает, стремясь к значению, полученному для пласта в отсутствии прослойка. График 2, наоборот, возрастает по мере увеличения прочности прослойка, также приближаясь к результатам структурно однородного пласта с исходной прочностью. Следует отметить, что результаты, полученные по двум подходам, незначительно отличаются друг от друга, максимальная разность между ними составляет около 8,5 %.

На рис. 8 построены графики зависимости ширины предельно напряжённой зоны от предела прочности прослойка. График 1 также построен по результатам расчёта пласта с прослойком согласно изложенному в статье подходу, а график 2 построен для пласта со средневзвешенными характеристиками прочности.



Рис. 8. Графики зависимости ширины предельно напряжённой зоны от предела прочности прослойка

Из рисунка следует, что график 1 изменяется более существенно, чем график 2. Причём, график 1 расположен ниже графика 2, следовательно, ширина предельно напряжённой зоны в подходе о последовательном переходе сначала прослойка, а затем пласта, меньше, чем в подходе, в котором используется средневзвешенная прочность пласта. Максимальная разница в ординатах этих графиков также незначительна и составляет 8 %.

Как следует из анализа приведённых результатов, параметры опорного давления, полученные по двум подходам, сопоставимы друг с другом. Существенная разница в результатах проявляется лишь в непосредственно краевой части пласта. Так, в соответствии с подходом о переходе в предельное состояние сначала прослойка, а затем самого пласта напряжение σ<sub>2</sub> на его кромке равно пределу прочности прослойка σ<sub>0</sub>, а согласно подходу о средневзвешенной прочности на кромке пласта оно равно его средневзвешенной прочности. Напряжения могут отличаться друг от друга в несколько раз, и это обстоятельство существенным образом скажется в расчётных оценках прогнозов газодинамических явлений.

### выводы

 В пласте, имеющем прослоек, максимум опорного давления несколько больше, а протяжённость предельно напряжённой зоны немного меньше протяжённости предельно напряжённой зоны в структурно однородном пласте.

2. Эпюры распределения напряжений, построенные по двум подходам: о последовательном переходе в предельное состояние сначала прослойка, а затем пласта и об учёте прослойка в расчётах путём вычисления средневзвешенной прочности пласта и его дальнейшем расчёте как структурно однородного, существенно отличаются в краевых частях, примыкающих к кромке пласта. В этой связи результаты прогноза газодинамических явлений, выполненные на основе поля напряжений, полученных по двум подходам, могут значительно отличаться друг от друга не только количественно, но и качественно. Т. е. прогноз, полученный на основе средневзвешенной прочности пласта, может быть ошибочным и не выявить возможного газодинамического события, поскольку поле напряжений в пласте окажется завышенным и не позволит пластовому метану проявить свою пагубную роль.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. М.: Углетехиздат, 1954. 384 с.

2. Христианович С.А. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1981. 484 с.

3. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.

4. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. М.: Недра, 1979. 296 с.

5. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.

6. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.

7. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С., Фельдман И.А. Теория защитных пластов. М.: Недра, 1976. 223 с.

8. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В. и др. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Новосибирск, 2011. 524 с.

9. Зыков В.С. Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах. Кемерово, 2010. 334 с.

10. 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.

11. Баклашов И.В. Основы геомеханики. М., 2004. Т. 1. 208 с.

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

13. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Изаксон В.Ю. Построение областей неустойчивости двухсвязного массива горных пород с прочностной анизотропией // Горный информационноаналитический бюллетень. 2009. № 8. С. 313–320.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Черданцев Н.В. Один из подходов к построению траектории трещины гидроразрыва в массиве горных пород вблизи горной выработки // Прикладная математика и механика.

## 2020. № 2. C. 208–233.

18. Черданцев Н.В. Об одном подходе к расчёту напряжённого состояния краевой зоны угольного пласта, вмещающего непрочный прослоек // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2021. № 1. С. 5–16.

19. Черданцев Н.В. Оценка геомеханического состояния краевой зоны угольного пласта, вмещающего непрочный прослоек // Прикладная математика и механика. 2021. № 2. С. 239–256.

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

#### DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.92.56.001

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

# PARAMETERS OF THE REFERENCE PRESSURE IN THE EDGE ZONE OF THE FOR-MATION WITH A LOW-STRENGTH INTERMEDIATE PRODUCED BY THE PREPARATION

The methods of mechanics of the deformable solid are presented the results of solving the problem on the stressed state of the marginal zone of the coal seam containing the «weak» interlayer. In this task, the grid of sliding lines first begins to develop in the extremely stressed zone of the interlayer, but at some distance from the edge of the formation, the stresses in the interlayer increase and reach the ultimate strength of the formation. As a result, a sliding line arises in it, which is a continuation of the sliding line in the interlayer, which serves as a boundary line for a grid of sliding lines spreading and deep into the formation.

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 integral equations.

Comparative estimates of the reference pressure parameters obtained from the solution of the problem based on the approach of discrete transition to the limit state first of the interlayer, and then of the formation, and the problem in which the strength characteristics of the formation and the interlayer are taken into account as weighted average in terms of the capacity of the formation are given. It is shown that the results in two approaches are close, but there are also fundamental differences in them.

Keywords: COAL BED, TREATMENT MINE, EXTREMELY STRESSED ZONES, CHARAC-TERISTICS OF FORMATION STRENGTH, SLIDING LINES, BOUNDARY TASKS OF LIMIT STATE.

#### REFERENCES

1. Ruppeneyt K.V. Some Questions of Rock Mechanics. M.: House of Coal, 1954. 384 p. [In Russ.].

2. Khristianovich S.A. Continuum Mechanics. M.: Science, 1981. 484 p. [In Russ.].

3. Petukhov I.M., Linkov A.M. The mechanics of rock bursts and emissions. M.: Nedra, 1983. 280 p. [In Russ.].

4. Chernov O.I., Puzyrev V.N. The forecast of sudden outbursts of coal and gas. M.: Nedra, 1979. 296 p. [In Russ.].

5. Fisenko G.L. For the Limit state of rocks around an excavation. M.: Nedra, 1976. 272 p. [In Russ.].

6. Borisov A.A. Mechanics of rock and arrays. M.: Nedra, 1980. 360 p. [In Russ.].

7. Petukhov I.M., Linkov A.M., Sidorov V.S., Feldman I.A. Theory of Protective Layers. M.: Nedra, 1976. 223 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, 2011. 524 p. [In Russ.].

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

10. 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.].

11. Baklashov I.V. Fundamentals of geomechanics. M., 2004. T. 1. 208 p. [In Russ.].

12. 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.].

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

14. 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 [Gorny informatsionno-analiticheskiy bulletin]. 2009. No. 57. P. 122–125. [In Russ.].

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

16. 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 // Industrial safety [Bezo-pasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 6. P. 7–13. [In Russ.].

17. 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.].

18. Cherdantsev N.V. On one approach to the calculation of the stress state of the marginal zone of a coal seam containing a fragile interlayer // Bulletin of the Scientific Center of VostNII on Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologich-eskoy bezopasnosti]. 2021. No. 1. P. 5–16. [In Russ.].

19. 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.].

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