

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНОМ ГЕОМАССИВЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Л.Д. Павлова¹, В.Н. Фрянов¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ),
Новокузнецк, Россия, e-mail: ld_pavlova@mail.ru

Аннотация: Изложены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния структурно неоднородного геомассива при изменчивости физико-механических свойств и глубины залегания угольного пласта и вмещающих его пород в зоне влияния подготовительной подземной выработки. В качестве критериев оценки эксплуатационной устойчивости выработки приняты конвергенция боков, кровли и почвы, форма и размеры участков предельного состояния и разрушения пород в окрестности выработки. По результатам численного моделирования обоснованы факторы, влияющие на устойчивость подземных выработок угольных шахт: прочность угля в пласте, прочность породных прослоек в угольном пласте, породах кровли и почвы, изменчивость глубины залегания угольных пластов на разных участках пликтивных геологических нарушений. Практическое использование полученных результатов моделирования позволяет учитывать формы и размеры зон разрушения пород в приконтурном массиве при разработке и реализации технологических решений, обеспечивающих профилактику опасных производственных ситуаций на этапах строительства и эксплуатации подземных выработок. Выявленные зависимости конвергенции кровли, почвы и боков выработки, размеров зон предельного состояния геомассива при изменении физико-механических свойств угля и пород планируется использовать при создании интеллектуальной системы прогнозирования устойчивости подземных выработок.

Ключевые слова: моделирование, угольный пласт, подготовительная выработка, геомассив, изменчивость свойств пород, конвергенция, напряжения, зоны предельного состояния пород, прочность угля и пород, устойчивость выработки.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20080, <https://rscf.ru/project/25-21-20080/> и гранта Кемеровской области – Кузбасса.

Для цитирования: Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Моделирование геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве для оценки устойчивости подготовительных выработок угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 8. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_8_0_5.

Modeling geomechanical processes in structurally nonuniform geomass for stability estimation of temporary roadways in coal mines

L.D. Pavlova¹, V.N. Fryanov¹

¹ Siberian State Industrial University (SibSIU), Novokuznetsk, Russia, e-mail: ld_pavlova@mail.ru

Abstract: The article describes the numerical stress–state modeling of structurally nonuniform geomass at variation of the physical and mechanical properties and occurrence depth of a coal seam and enclosing rock mass in the influence zone of a temporary roadway. The stability criteria of the roadway are assumed to be the convergence of sidewalls, roof and floor of the roadway, and the shape and size of the zones of limit state and failure in rock mass in the vicinity of the roadway. Using the numerical modeling results, the stability factors are substantiated for underground openings in coal mines: coal seam strength, strength of dirt bands in coal seam and in roof and floor rock mass, variance of coal occurrence depths in different areas of plicative dislocations. The practical application of the modeling results makes it possible to take into account shapes and sizes of failure zones in adjacent rock mass of mine roadways in development and implementation of process designs aimed at prevention of hazardous industrial situations at the stages of construction and operation. The revealed functional connections between the convergence of sidewalls, roof and floor of mine roadways, sizes of limit state zones in geomass and the change of the physical and mechanical properties of coal and rocks will be used in creation of an intelligent system for the stability prediction in underground openings.

Key words: modeling, coal seam, temporary roadway, geomass, variability of rock properties, convergence, stresses, limit state zones in rocks, strength of coal and rocks, mine roadway stability.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 25-21-20080, <https://rscf.ru/project/25-21-20080/> and the grant of the Kemerovo Region – Kuzbass.

For citation: Pavlova L. D., Fryanov V. N. Modeling geomechanical processes in structurally nonuniform geomass for stability estimation of temporary roadways in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(8):5-16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_8_0_5.

Введение

При расследовании причин возникновения аварий или инцидентов в подземных горных выработках, как правило, проводится анализ соответствия реализованных технологических и организационных управляющих решений требованиям нормативных документов и проектной документации. Однако не всегда удается точно идентифицировать негативные производственные ситуации для предотвращения их в будущем. В заключениях комиссий по расследованию несчастных случаев одной из

причин указывается влияние природных условий, не учтенных в проектной документации. К таким условиям можно отнести пространственную изменчивость формы, размеров и свойств структурно неоднородного геомассива при подземной разработке угольных месторождений [1–3].

Исследования влияния природных факторов на безопасность и эффективность горных работ в сложных горно-геологических условиях проводятся в России и за рубежом [4–9], однако для обоснования технологических решений,

адаптивных к условиям глубоких угольных шахт Кузбасса, требуется оценка реального состояния структурно неоднородного геомассива, включающего систему подземных выработок.

Например, глубина залегания отрабатываемого пласта в условиях Ерунаковского месторождения в границах выемочной панели изменяется в диапазоне 290–530 м, мощность пласта – 1,84–2,65 м. Пласт включает 3–4 породных прослоя, сложенных алевролитом мелкозернистым или его углистыми разностями. Ниже отрабатываемого пласта залегает весьма сближенный нерабочий пласт переменной мощности. Расстояние между этими сближенными пластами в границах выемочной панели варьируется в интервале 0,7–11 м. Эксплуатационная устойчивость подготовительной выработки по отрабатываемому пласту снижается при интенсивном разрушении и пучении пород между пластами в виде многосарнирных арок, выдавливания разрушенных пород под боками выработки, расслоения пород по поверхностям напластования.

Характерной особенностью для шахт Кузбасса, расположенных в Терсинском геолого-экономическом районе, является изменчивость структурной неоднородности угольных пластов и вмещающих их породных слоев. Например, мощность отрабатываемого пласта изменяется в диапазоне 1,80–2,38 м с включением породных прослоек. Мощность ложной кровли и почвы варьируется в интервале 0,16–1,20 м, мощность пород непосредственной кровли составляет 2,00–20,76 м. Вмещающие пласт боковые породы представлены переслаиванием алевролитов, аргиллитов, углистых прослоек переменной мощности и прочности.

Угольные пласты Томь-Усинского месторождения характеризуются мощностью угольных пластов в диапазоне

3,87–13,35 м [1]. В этом случае подземные выработки могут располагаться у кровли или почвы пласта. Соответственно эксплуатационная устойчивость таких выработок зависит от совокупного влияния не только свойств угля в пласте и вмещающих его пород, но и положения выработки в пласте относительно боковых пород, угольных целиков и соседних отрабатываемых угольных слоев.

Кроме природной изменчивости свойств структурно неоднородного геомассива на неравномерность проявления горного давления в окрестности горных выработок оказывают влияние техногенные факторы: угольные целики на отрабатываемых и соседних сближенных пластах, циклическое зависание и обрушение подработанных пород кровли в очистном выработанном пространстве, неравномерное подвигание очистного забоя и др. [2, 10, 11].

С учетом изложенного актуальной научно-практической задачей является прогнозирование аномальных проявлений геомеханических процессов в окрестности подземных выработок с учетом природной изменчивости физико-механических свойств структурно неоднородного геомассива для обоснования технологических решений по обеспечению устойчивости подземных выработок и профилактики аварий и инцидентов.

Объект и методы исследования

В качестве объекта исследования приняты горно-геологические и горнотехнические условия отработки на шахтах Кузбасса угольных пластов и вмещающих пород, которые характеризуются следующими признаками:

- изменчивость физико-механических свойств угля и пород на отдельных отрабатываемых выемочных столбах;

- структурная неоднородность угольных пластов и вмещающих пород при изменении глубины разработки;
- переменные прочностные и деформационные свойства пород на контуре протяженных подготовительных выработок.

Основу математической модели геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве составляют дифференциальные уравнения механики сплошной среды, описывающие упругое и упругопластическое деформирование горных пород при проведении подготовительной выработки [12 – 15].

На внешнем контуре расчетной области задается нагрузка, соответствующая исходному гравитационному полю напряжений. Вертикальная нагрузка равна γH , горизонтальная — $\lambda \gamma H$, где γ — объемный вес пород, H — глубина залегания пласта; λ — коэффициент бокового давления. На границах модели касательные напряжения равны нулю. На нижней границе модели вертикальные смещения равны нулю. На верхней

границе модели у земной поверхности вертикальные напряжения отсутствуют. Между соседними породными слоями и угольным пластом приняты условия жесткого контакта.

Для численной реализации применяется метод конечных элементов [16]. Повышение точности расчетов достигается за счет формирования неравномерной конечно-элементной сетки: длина стороны треугольного конечного элемента вблизи контура выработки принята равной 0,1 м, а вне зоны влияния выработки постепенно увеличивается до 20 м.

Общее количество породных слоев и прослоек угольного пласта принимается равным 100, что позволяет полностью описать структурную колонку по геологической скважине, пробуренной с земной поверхности. К каждой вершине конечного элемента приложены узловые силы, соответствующие третьей части веса пород этого элемента. Объемный вес угля принят 1,3 т/м³, пород — 2,5 т/м³.

Таблица 1

Физико-механические свойства горных пород в окрестности подземной выработки для базового варианта
Physical and mechanical properties of rocks in neighborhood of mine roadways in baseline case

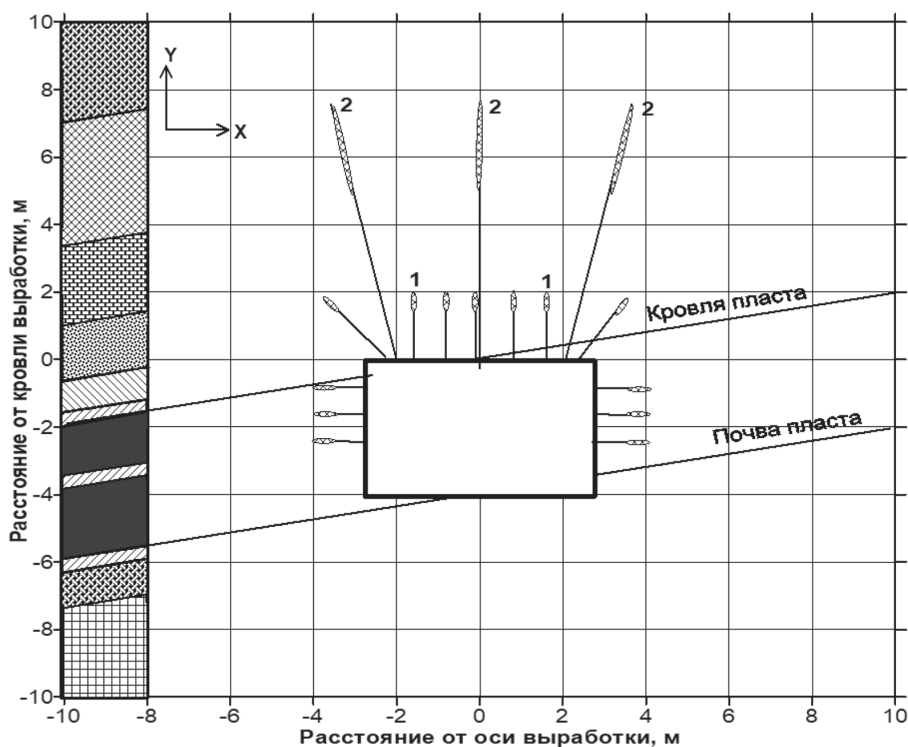
Тип кровли, почвы	Порода	Мощность породных слоев, м	Предел прочности пород, МПа, при		Модуль Юнга $E \cdot 10^{-4}$, МПа	Коэффициент Пуассона
			сжатию	растяжению		
Основная кровля	алевролиты и песчаники	18,00	40,00	4,80	3,2	0,22
Непосредственная кровля	аргиллиты и алевролиты	4,50	31,00	4,08	2,8	0,26
Ложная кровля	аргиллиты	0,20	15,89	2,10	1,8	0,35
Угольный пласт	уголь	4,00	10,00	1,30	0,8	0,42
Породный прослой	аргиллиты	0,15	18,00	2,20	1,9	0,36
Ложная почва	аргиллиты	0,25	26,00	3,05	2,0	0,35
Непосредственная почва	алевролиты	3,80	35,00	3,80	2,8	0,25

Для исследования устойчивости подземных выработок при изменчивости свойств массива горных пород применен метод вариантов, согласно которому на основе результатов численного моделирования изучалось отклонение вычисленных значений напряжений, деформаций и остаточной прочности угля и пород от соответствующих параметров базового варианта (табл. 1). Физико-механические свойства угля и пород для базового варианта приняты согласно результатам исследований, представленных в [1].

Глубина залегания пласта в базовом варианте $H = 400$ м. Горизонтальная длина расчетной области принята равной 400 м с расположением подготовительной выработки в середине модели. Начало координат расположено на пе-

ресечении кровли угольного пласта и вертикальной оси подземной выработки.

На рис. 1. представлена расчетная схема в виде плоского вертикального сечения участка геомассива размером 20×20 м, перпендикулярного оси подготовительной выработки, пройденной по простиранию угольного пласта. Контур выработки поддерживается анкерной крепью в соответствии с распространенной на шахтах Кузбасса схемой крепления [17, 18]. Анкеры первого уровня АСП-20В длиной 1,8 м в кровле и боках выработки обеспечивают разрывное усилие до 95 кН. Канатные анкеры второго уровня АСП длиной 7,5 м с разрывным усилием до 100 кН предназначены для предотвращения расслоения пород непосредственной кровли и подшивки ее к породам основной кровли [19].



1 – анкеры первого уровня; 2 – канатные анкеры второго уровня

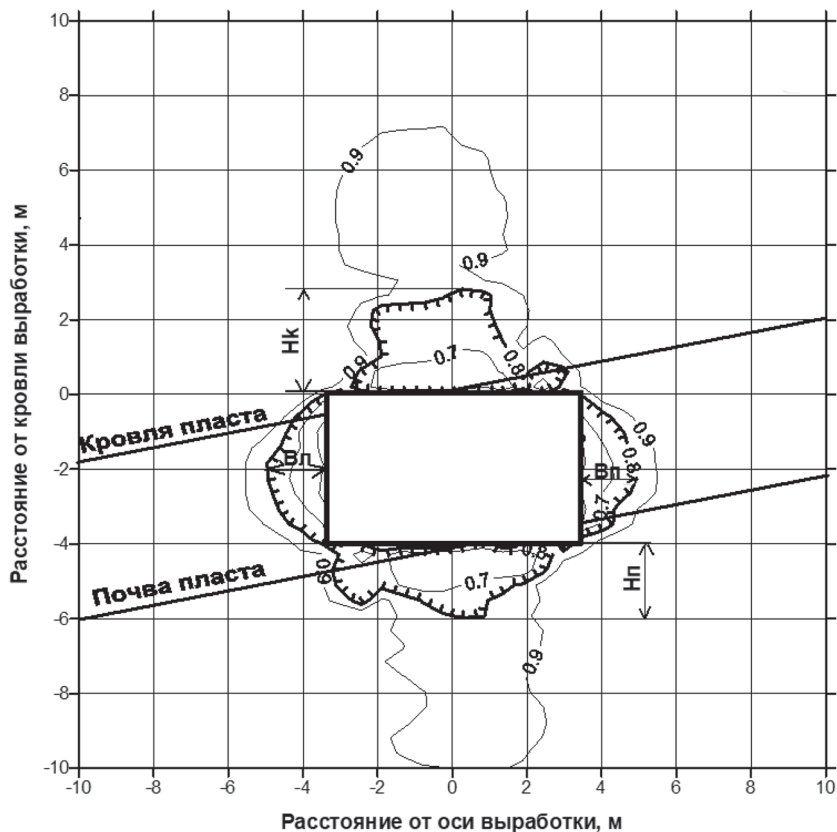
Рис. 1. Расчетная схема

Fig. 1. Analytical model

Таблица 2

Конвергенция кровли–почвы и боков выработки при изменении предела прочности угля и пород
Roof–floor and sidewall convergence in mine roadway at variation of strength limit in coal and rocks

Наименование породы	Предел прочности при сжатии, МПа	Конвергенция	
		направление	диапазон изменения, мм
Уголь в пласте	7–13	кровля–почва	290–270
Уголь в пласте	7–13	бок–бок	330–170
Породы в кровле	26–40	кровля–почва	290–270
Породы в кровле	26–40	бок–бок	260–230
Породы в почве	26–46	кровля–почва	280–240
Породы в почве	26–46	бок–бок	240–220



H_k — высота зоны в кровле выработки; H_n — глубина зоны в почве выработки;
 B_n — ширина зоны в левом боку выработки; B_p — ширина зоны в правом боку выработки

Рис. 2. Изолинии распределения коэффициента остаточной прочности угля и пород, размеры зон их предельного состояния, м

Fig. 2. Contour curves of remaining strength coefficient of coal and rocks, and sizes of their limit state zones, m

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам моделирования напряженно-деформированного состояния геомассива получено распределение геомеханических параметров в окрестности подземной выработки в зависимости от изменения физико-механических свойств пород и глубины залегания угольных пластов. Вычислительные эксперименты проводились с использованием авторского комплекса программ [20].

Для оценки устойчивости подготовительной выработки, расположенной на глубине 400 м, исследовались конвергенция боков, кровли и почвы выработки, а также форма и размеры зон предельного состояния пород в кровле, почве и боках выработки.

Согласно полученным результатам (табл. 2), изменение предела прочности угля при сжатии оказывает влияние на конвергенцию кровли–почвы и боков выработки. Увеличение предела прочности пород при сжатии в кровле и почве выработки почти в 2 раза приводит к снижению конвергенции на 10–15%, повышению жесткости приконтурного массива горных выработок за счет умень-

шения расслоения и сдвига породных слоев по контактам.

На рис. 2 приведены изолинии распределения коэффициента остаточной прочности угля и пород, который вычисляется как отношение предельных касательных напряжений паспорта прочности пород к вычисленным касательным напряжениям. Границы расположения зон предельного состояния вмещающих пород в окрестности подготовительной выработки определяются значением коэффициента остаточной прочности, равным 0,8.

На основе анализа результатов моделирования (табл. 3) установлено, что увеличение предела прочности угля при сжатии приводит к сокращению размеров зоны предельного состояния пород в кровле и боках выработки. Возможно выдавливание и отжим угля в выработку в виде блоков шириной 1–2 м. При увеличении предела прочности пород кровли ширина зоны предельного состояния угля в боках выработки уменьшается на 10–20%. Соответствующее увеличение предела прочности породных прослоек в кровле также приводит к уменьшению высоты зоны предельного состояния пород.

Таблица 3

Размеры зон предельного состояния пород в кровле и боках выработки при изменении предела прочности угля и пород

Sizes of limit state zones in roof and sidewalls of mine roadway at variation of strength limit in coal and rocks

Наименование породы	Предел прочности при сжатии, МПа	Зоны предельного состояния пород, м	
		положение зоны	размеры зоны, м
Уголь в пласте	7–13	кровля	1,1–0,8
Уголь в пласте	7–13	бок	2,2–1,0
Породы в кровле	26–40	кровля	1,0–0,7
Породы в кровле	26–40	бок	1,8–0,8
Породы в почве	26–46	бок	1,8–1,4
Прослойка породы в пласте	6–30	бок	1,9–1,4
Прослойка породы в кровле	13–48	кровля	0,7–0,4

Таким образом, устойчивость подготовительной выработки при ее проведении и эксплуатации повышается при увеличении прочности угля и породных прослоек. В этой связи рекомендуется при наличии в угольном пласте или породах кровли слабых породных прослоек увеличивать плотность установки анкерной крепи, в том числе канатных анкеров глубокого заложения. В качестве технологических решений по предотвращению расслоения пород кровли на контактах между слоями вблизи подготовительного забоя предлагается применение механизированной крепи шагающего типа [21].

При отработке выемочных панелей по длине выемочного столба изменяются глубина залегания пласта, физико-механические свойства, структура и напряженно-деформированное состояние массива горных пород, что подтверждено результатами экспериментальных и аналитических исследований [4, 7, 22].

Для исследования влияния глубины разработки на устойчивость подземной выработки, форму и размеры зон разрушения пород проведено моделирование геомеханических процессов при распо-

ложении подготовительной выработки на разных глубинах с учетом изменчивости прочностных и деформационных параметров угольных пластов и вмещающих их пород.

По результатам моделирования установлено, что конвергенция боков, кровли и почвы выработки при изменении глубины залегания пласта 200–600 м и прочих равных условиях, указанных в табл. 1, почти линейно увеличивается (рис. 3).

Влияние изменчивости физико-механических свойств массива горных пород при увеличении глубины залегания угольных пластов на высоту и ширину зон предельного состояния пород кровли и почвы представлено на рис. 4. Установлено, что интенсивный отжим угля с боков выработки начинается при условии $k\gamma H \geq \sigma_{сж}$, где k – коэффициент концентрации вертикальных напряжений в боках выработки; $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород при сжатии.

По результатам моделирования установлено, что коэффициент концентрации вертикальных напряжений в боках выработки изменяется в диапазоне 1,1–1,2. Условием формирования вы-

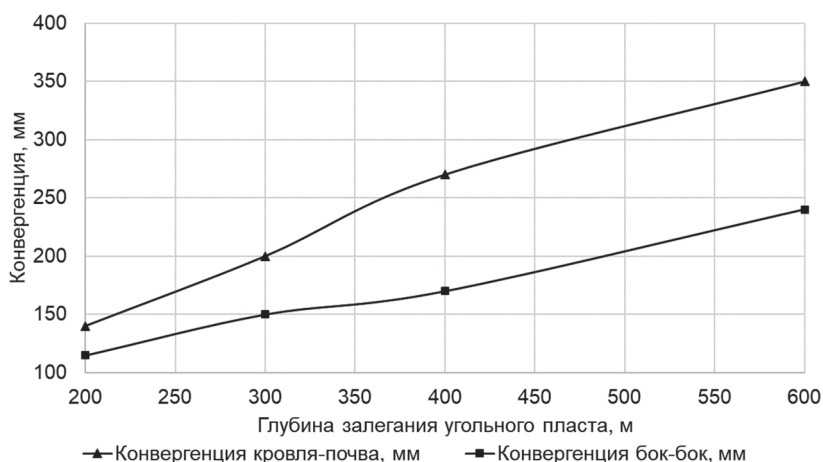


Рис. 3. Графики изменения конвергенции бок–бок, кровля–почва подготовительной выработки
Fig. 3. Curves of sidewall–sidewall and roof–floor convergence in temporary roadway

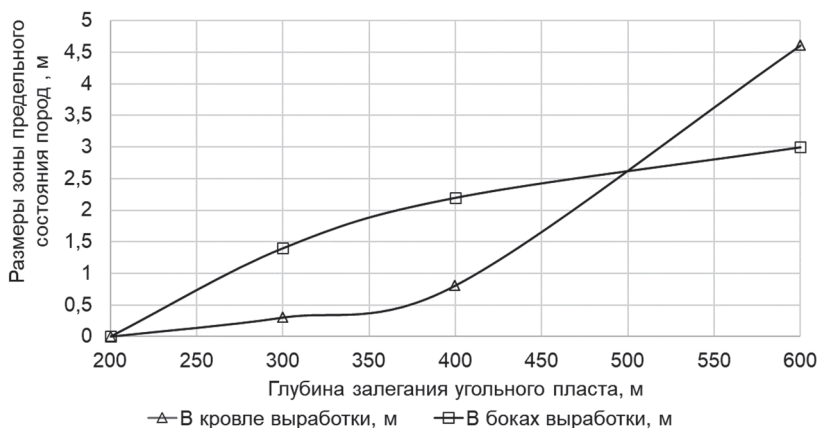


Рис. 4. Графики изменения размеров зоны предельного состояния пород в кровле и боках выработки
 Fig. 4. Curves of sizes of limit state zone in roof rock and in sidewalls of temporary roadway

валов пород непосредственной кровли пласта в зоне влияния выработки является зависимость $\sigma_{гор} \geq \sigma_{раст}$, где $\sigma_{гор}$ — горизонтальные напряжения; $\sigma_{раст}$ — предел прочности пород при растяжении.

На основе анализа результатов моделирования геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве проведена оценка устойчивости подготовительных выработок угольных шахт и обоснованы факторы, влияющие на устойчивость подземных выработок угольных шахт:

- прочность угля в пласте;
- прочность породных прослоек в угольном пласте, породах кровли и почвы;
- изменчивость глубины залегания угольных пластов на разных участках плективных геологических нарушений.

Дальнейшая работа в этом направлении проводится с целью исследования влияния изменчивости физико-механических свойств структурно неоднородного массива горных пород на устойчивость очистных выработок.

Заключение

Проведены численные исследования влияния изменчивости физико-механических свойств горных пород на на-

пряженно-деформированное состояние структурно неоднородного геомассива. Установлено, что устойчивость подземной выработки за счет увеличения конвергенции боков, кровли — почвы, размеров зон предельного состояния пород в окрестности выработки снижается при уменьшении прочности угля и породных прослоек в пласте и боковых породах, а также при увеличении глубины расположения выработки.

Рекомендуется при наличии в угольном пласте или породах кровли слабых породных прослоек увеличивать плотность установки анкерной крепи, в том числе канатных анкеров глубокого заложения, что позволит повысить сопротивление расслоению и сдвигу породных слоев по контактам. Для предотвращения вывалов пород незакрепленной кровли вблизи подготовительного забоя предлагается применение комбинированной крепи или механизированной крепи шагающего типа.

Полученные результаты моделирования в комплексе с натурными измерениями геомеханических параметров рекомендуется использовать при разработке и реализации интеллектуальной системы прогнозирования устойчивости подземных выработок угольных шахт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламанов В. А., Петров А. И. Физико-технические свойства горных пород и углей. — М.: Недра, 1994. — 447 с.
2. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
3. Курленя М. В., Миренков В. Е. Формулировка алгоритма для вычисления констант, характеризующих массив пород с выработкой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 4. — С. 3–9. DOI: 10.15372/FTPRPI20190401.
4. Серяков В. М., Красновский А. А. Напряженное состояние крепи подготовительной выработки в неустойчивом массиве горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 6. — С. 43–52. DOI: 10.15372/FTPRPI20220605.
5. Ильясов Б. Т., Кульсантов Р. В., Неугомонов С. С., Силюянов Н. В. Оценка устойчивости закрепленных выработок на основе численного моделирования методом конечно-дискретных элементов // Горный журнал. — 2023. — № 1. — С. 118–123. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.20.
6. Chang J., He K., Pang D., Li D., Li C., Sun B. Influence of anchorage length and pretension on the working resistance of rock bolt based on its tensile characteristics // International Journal of Coal Science & Technology. 2021, vol. 8, no. 6, pp. 1384–1399. DOI: 10.1007/s40789-021-00459-9.
7. Zhang C., Zhao Y., Han P., Bai Q. Coal pillar failure analysis and instability evaluation methods: A short review and prospect // Engineering Failure Analysis. 2022, vol. 138, article 106344. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106344.
8. Kuang Z., Qiu S., Li S., Du S., Huang Y., Chen X. A new rock brittleness index based on the characteristics of complete stress–strain behaviors // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021, vol. 54, no. 3, pp. 1109–1128. DOI: 10.1007/s00603-020-02311-z.
9. Sui Q., He M., He P., Xia M., Tao Z. State of the art review of the large deformation rock bolts // Underground Space. 2022, vol. 7, no. 3, pp. 465–482.
10. Жабко А. В. Механика пластического деформирования горных пород при объемном сжатии и механизм горных ударов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2022. — № 4. — С. 47–63. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-4-47-63.
11. Frenelus W., Peng H., Zhan G. J. An insight from rock bolts and potential factors influencing their durability and the long-term stability of deep rock tunnels // Sustainability. 2022, vol. 14, article 10943. DOI: 10.3390/su141710943.
12. Ержанов Ж. С., Сагинов А. С., Гуменюк Г. Н., Векслер Ю. А., Нестеров Г. А. Ползучесть осадочных горных пород. Теория и эксперимент. — Алма-Ата: Наука, 1970. — 208 с.
13. Проскураков Н. М. Управление состоянием массива горных пород. — М.: Недра, 1991. — 368 с.
14. Ефимов В. П. Применение интегрального критерия разрушения для определения прочности на растяжение и трещиностойкости горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 3. — С. 44–52. DOI: 10.15372/FTPRPI20190306.
15. Линник Ю. Н., Линник В. Ю., Жабин А. Б., Цих А. Взаимосвязь характеристик прочности неоднородностей в угольных пластах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 3. — С. 5–18. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_5.
16. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. — М.: Мир, 1976. — 464 с.
17. Демин В. Ф., Алиев С. В., Юсупов Х. А., Долгоносков В. Н., Портнов В. С., Ожигин С. Г. Совершенствование технологии анкерного крепления приконтурного массива при проведении горных выработок на угольных шахтах // Уголь. — 2022. — С. 56–60. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-56-60.
18. Разумов Е. А., Венгер В. Г., Калинин С. И., Зеляева Е. А. Исследование устойчивости подготовительных выработок, закрепленных анкерной крепью, оказавшихся в сложных аварийных ситуациях при отработке угольных пластов на шахтах Кузбасса // Уголь. — 2021. — № 11. — С. 13–18. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-11-13-18.
19. Демин В. Ф., Абеулов Е. А., Ахматнуров Д. Р., Мусин Р. А., Замалиев Н. М. Технология применения податливых анкеров при смешанном креплении в эксплуатационных выработках // Уголь. — 2025. — № 2. — С. 100–105. DOI: 10.18796/0041-5790-20252-100-105.
20. Фрянов В. Н., Павлова Л. Д., Цветков А. Б. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020618595. Программный комплекс для моделирования геомеханических процессов

в структурно неоднородном геомассиве при взаимном влиянии системы подземных горных выработок. 2020.

21. Klishin V. I., Nikitenko S. M., Malakhov Y. V., Fryanov V. N., Pavlova L. D. Rock mass – Multifunction mobile roof support interaction in mining // Journal of Mining Science. 2021, vol. 57, no. 3, pp. 361 – 369. DOI: 1134/S1062739121030017.

22. Семенова И. Э., Константинов К. Н., Кулькова М. С. Оценка напряженно-деформированного состояния массива пород в окрестности подземных выработок глубокого заложения комплексом инструментальных и численных методов // Горный журнал. – 2024. – № 1. – С. 22 – 28. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.04. **МАС**

REFERENCES

1. Shtumpf G. G., Ryzhkov Yu. A., Shalamanov V. A., Petrov A. I. *Fiziko-tekhicheskie svoystva gornyykh porod i ugley* [Physical and technical properties of rocks and coals], Moscow, Nedra, 1994, 447 p.

2. Kurlenya M. V., Seryakov V. M., Eremenko A. A. *Tekhnogennyye geomekhanicheskie polya napryazheniy* [Technogenic geomechanical stress fields], Novosibirsk, Nauka, 2005, 264 p.

3. Kurlenya M. V., Mirenkov V. E. Formulation of an algorithm for calculating constants characterizing a rock mass with a working. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2019, no. 4, pp. 3 – 9. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20190401.

4. Seryakov V. M., Krasnovsky A. A. Stress state of the development working support in an unstable rock mass. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2022, no. 6, pp. 43 – 52. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20220605.

5. Ilyasov B. T., Kulsantov R. V., Neugomonov S. S., Siluyanov N. V. Assessment of the stability of fixed workings based on numerical modeling by the finite-discrete element method. *Gornyy Zhurnal*. 2023, no. 1, pp. 118 – 123. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.01.20.

6. Chang J., He K., Pang D., Li D., Li C., Sun B. Influence of anchorage length and pretension on the working resistance of rock bolt based on its tensile characteristics. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2021, vol. 8, no. 6, pp. 1384 – 1399. DOI: 10.1007/s40789-021-00459-9.

7. Zhang C., Zhao Y., Han P., Bai Q. Coal pillar failure analysis and instability evaluation methods: A short review and prospect. *Engineering Failure Analysis*. 2022, vol. 138, article 106344. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106344.

8. Kuang Z., Qiu S., Li S., Du S., Huang Y., Chen X. A new rock brittleness index based on the characteristics of complete stress – strain behaviors. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, no. 3, pp. 1109 – 1128. DOI: 10.1007/s00603-020-02311-z.

9. Sui Q., He M., He P., Xia M., Tao Z. State of the art review of the large deformation rock bolts. *Underground Space*. 2022, vol. 7, no. 3, pp. 465 – 482.

10. Zhabko A. V. Mechanics of plastic deformation of rocks under volumetric compression and the mechanism of rock bursts. *Minerals and Mining Engineering*. 2022, no. 4, pp. 47 – 63. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-4-47-63.

11. Frenelus W., Peng H., Zhan G. J. An insight from rock bolts and potential factors influencing their durability and the long-term stability of deep rock tunnels. *Sustainability*. 2022, vol. 14, article 10943. DOI: 10.3390/su141710943.

12. Erzhanov Zh. S., Saginov A. S., Gumenyuk G. N., Veksler Yu. A., Nesterov G. A. *Polzuchest' osadochnyykh gornyykh porod. Teoriya i eksperiment* [Creep of sedimentary rocks. Theory and experiment], Alma-Ata, Nauka, 1970, 208 p.

13. Proskuryakov N. M. *Upravlenie sostoyaniem massiva gornyykh porod* [Rock massif state management], Moscow, Nedra, 1991, 368 p.

14. Efimov V. P. Application of the integral failure criterion for determining the tensile strength and crack resistance of rocks. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2019, no. 3, pp. 44 – 52. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20190306.

15. Linnik Yu. N., Linnik V. Yu., Zhabin A. B., Zich A. Interplay of strengths of nonuniformities in coal seams. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 3, pp. 5 – 18. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_5.

16. Oden J. *Konechnyye elementy v nelineynoy mekhanike sploshnykh sred* [Finite elements in non-linear continuum mechanics], Moscow, Mir, 1976, 464 p.

17. Demin V. F., Aliev S. V., Yusupov Kh. A., Dolgonosov V. N., Portnov V. S., Ozhigin S. G. Improving the technology of anchor fastening of the marginal massif during the construction of mine workings in coal mines. *Ugol'*. 2022, pp. 56 – 60. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-9-56-60.

18. Razumov E. A., Venger V. G., Kalinin S. I., Zelyaeva E. A. Study of stability of development workings secured with roof bolting, which found themselves in difficult emergency situations during coal seam mining in Kuzbass mines. *Ugol'*. 2021, no. 11, pp. 13 – 18. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-11-13-18.

19. Demin V. F., Abeulov E. A., Akhmaturov D. R., Musin R. A., Zamaliev N. M. Technology of using flexible anchors for mixed fastening in production workings. *Ugol'*. 2025, no. 2, pp. 100 – 105. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-20252-100-105.

20. Fryanov V. N., Pavlova L. D., Tsvetkov A. B. *Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM No. 2020618595* [Certificate of registration of computer program No. 2020618595], 2020. [In Russ].

21. Klishin V. I., Nikitenko S. M., Malakhov Y. V., Fryanov V. N., Pavlova L. D. Rock mass – Multifunction mobile roof support interaction in mining. *Journal of Mining Science*. 2021, vol. 57, no. 3, pp. 361 – 369. DOI: 1134/S1062739121030017.

22. Semenova I. E., Konstantinov K. N., Kulkova M. S. Assessment of the stress-strain state of a rock massif in the vicinity of deep underground workings using a set of instrumental and numerical methods. *Gornyi Zhurnal*. 2024, no. 1, pp. 22 – 28. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2024.01.04.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фрянов Виктор Николаевич¹ – д-р техн. наук,
профессор, профессор, e-mail: zzz338@rdtc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6803-458X,

Павлова Лариса Дмитриевна¹ – д-р техн. наук,
профессор, зав. кафедрой,
e-mail: ld_pavlova@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2480-8165,

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

Для контактов: Павлова Л.Д., e-mail: ld_pavlova@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Fryanov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor, e-mail: zzz338@rdtc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6803-458X,

L.D. Pavlova¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Chair, e-mail: ld_pavlova@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2480-8165,

¹ Siberian State Industrial University (SibSIU),
654007, Novokuznetsk, Russia.

Corresponding author: L.D. Pavlova, e-mail: ld_pavlova@mail.ru.

Получена редакцией 12.03.2025; получена после рецензии 22.04.2025; принята к печати 10.07.2025.

Received by the editors 12.03.2025; received after the review 22.04.2025; accepted for printing 10.07.2025.

