

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 539.3

ДИНАМИКА СМЕЩЕНИЙ ПОРОД КРОВЛИ ВЫРАБОТКИ В ПРОЦЕССЕ ВЕДЕНИЯ ОЧИСТНЫХ РАБОТ

М. В. Курленя, В. Е. Миренков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: mirenkov@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Предлагается новый метод прогноза горного давления, включающий статический, кинематический и динамический подходы. Статический предусматривает известный классический расчет деформированного состояния на основе рекомендаций при ведении горных работ. Кинематический учитывает собственный вес пород и конкретизирует статический. Динамика отслеживается с появлением нелинейных деформаций при увеличении выработанного пространства и требует для реализации дополнительных натуральных данных о поведении массива. Все три подхода формируют полные смещения кровли выработки. Обсуждается квазистатический вариант учета динамики через определение податливости обрабатываемого пласта впереди движущегося забоя и возможность получения экспериментальных данных для реализации нового метода.

Выработка, пласт, породы, управления, решение, некорректность, статика, кинематика, динамика

DOI: 10.15372/FTPRPI20200101

До настоящего времени процесс получения данных о деформировании горного массива сводился к статическому рассмотрению схем, описывающих горную ситуацию около выработки, и использованию программ на основе метода конечных элементов. Линейное поле напряжений нетронутого массива в расчетах упрощалось до значений в центре будущей выработки, которые формулировались на бесконечности, а на контуре принимались нулевые значения [1–5]. В такой постановке задачи переходят в разряд не имеющих физического смысла по классификации уравнений математической физики.

В механике горных пород исследуется плоскость с отверстием или пространство с полостью, которые имеют бесконечно удаленную точку, что требует, согласно общей теории уравнений математической физики, нулевые граничные условия при удалении от выработки. Некорректность формулировок можно показать на примере сжатия области счета длиной L и $2L$

одной и той же силой: увеличение длины приводит к росту смещений точек приложения силы, т. е. в пределе к бесконечности. Правильная постановка проблемы связана с решением дополнительной задачи, когда граничные условия задаются на контуре выработки и исчезают на бесконечности [6–8]. Даже правильный подход в [6, 7] использует не имеющие физического смысла решения для трещины, как показано в [9]. В случае регулярных формулировок задач с физическим смыслом рассматриваются симметричные граничные условия и симметричные смещения для пород кровли и почвы выработки, что находится в противоречии с натурными замерами смещений. За исключением частных случаев строения массива пород, смещения кровли больше, чем смещения почвы выработки [10].

Неточность в расчеты вносилась априорным заданием параметров, характеризующих массив горных пород с выработкой. Исходное поле напряжений принимается в виде

$$\sigma_y = \gamma(H - y), \quad \sigma_x = \lambda\gamma(H - y),$$

где H — глубина заложения будущей выработки; λ — коэффициент бокового распора; γ — усредненная величина веса пород.

Если массив пород сложен из кусочно-однородных блоков, каждый из которых характеризуется модулем Юнга, коэффициентом Пуассона, собственным весом материала блока и условиями на контактах между ними, то точность расчетов уменьшается. Для идентификации этих параметров необходимо решать обратные задачи, относящиеся к классу некорректных задач математической физики.

КИНЕМАТИКА

Известные решения задач механики горных пород по расчету напряженно-деформированного состояния около выработки не учитывают собственный вес пород. В [8] предложена феноменологическая теория учета собственного веса пород около ослаблений в горном массиве. Расчет полных смещений в породах кровли и почвы представлен на рис. 1. Используя классический подход, вычисляют напряженно-деформированное состояние около выработки и зону влияния ее в породах кровли и почвы (пунктирная линия на рис. 1). Вес пород кровли γ_1 и почвы γ_2 различны и не совпадают с γ .

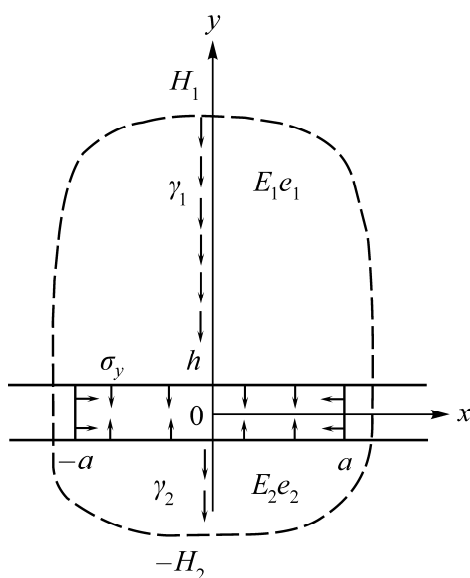


Рис. 1. Расчет смещений массива от собственного веса пород

Учет собственного веса пород позволяет идентифицировать параметры, характеризующие горный массив с выработкой. Некорректность исключается регуляризацией или получением точных уравнений, связывающих граничные значения компонент напряжений и смещений. Предлагается система интегральных уравнений, участвующая в формулировке всех трех основных задач и устраняющая регуляризацию:

$$f(t_0) + 2\mu g(t_0) + \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{f(t) + 2\mu g(t)}{t - t_0} dt = 0, \quad (1)$$

$$\overline{\kappa f(t_0)} - 2\mu \overline{g(t_0)} + \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} \frac{\overline{\kappa f(t)} - 2\mu \overline{g(t)}}{t - t_0} dt = \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma} [f(t) + 2\mu g(t)] d \frac{\bar{t} - \bar{t}_0}{t - t_0},$$

где $\kappa = 3 - 4e$, $\mu = E[2(1 + e)]^{-1}$, e — коэффициент Пуассона; E — модуль Юнга; t_0 — аффикс точки границы Γ ; i — мнимая единица; $g = u + iv$ (u, v — компоненты смещений в направлении осей x и y);

$$f(t) = i \int_0^t (X_n + iY_n) ds, \quad (2)$$

X_n, Y_n — компоненты напряжений в направлении осей x и y ; черточка над функцией обозначает комплексно-сопряженное значение.

ДИНАМИКА

Прогресс в разработке более тонких методов исследования микроструктуры пород и механизма их разрушения протекает с ужесточением требований к условиям эксплуатации подземных сооружений. На нынешнем уровне невозможно выйти за рамки схематического понимания теории управления горным давлением вследствие недостатка экспериментальных данных и соответствующих теоретических разработок. Основная трудность состоит в том, что количественные соотношения можно строить только на основе предположений.

Разрушение трудно обрушаемой кровли происходит в окрестности движущегося забоя и не может быть объяснено с позиций статического (классического) и кинематического решений. По этой причине необходимо учитывать несимметрию деформирования, создаваемую динамической составляющей процесса, вызванного горными работами. Требуются дополнительные экспериментальные и теоретические исследования по образованию и учету несимметрии смещений. Главные и логически непротиворечивые факторы, обеспечивающие корректные формулировки задач, — это статический, кинематический и динамический аспекты и слабое место в системе вмещающих породы обрабатываемого пласта, приводящие к неупругому деформированию пласта. Сложное строение массива пород и связанное с этим большое количество характеризующих его параметров, а также непрерывная подготовка к разрушению и разрушение при очистной выемке не позволяют сформулировать и реализовать динамическую постановку проблемы напряженно-деформированного состояния. Вследствие этого предлагается квазистатический подход к описанию динамики с использованием дополнительных экспериментальных сведений о нарушениях геологической среды. Рассмотрим влияние увеличения выработанного пространства на смещения кровли и обрабатываемого угольного пласта.

Основные особенности начального приращения смещений при ведении очистных работ следующие. Точка кровли с максимальными приращениями находится в выработанном пространстве посреди пролетов в нормальных и параллельных линии фронта сечениях. Максимальные смещения происходят вслед за забоем, и их значения постепенно возрастают. Незна-

чительное влияние динамики ведения очистных работ позволяет рассчитывать смещения кровли с применением статического и кинематического подходов. Результат смещений отражает симметрию деформирования. Удобно определять параметры, точно характеризующие процесс деформирования за весь период разработки пласта. Характер развития смещений объясняется симметрией прогиба толщи массива, лежащего на податливом основании — угольном пласте. Он является переходным от кинематического к установившемуся динамическому влиянию на развитие смещений.

Максимальные величины приращений смещений кровли наблюдаются в рабочем пространстве очистных забоев вблизи борта вынимаемой полосы. Приращения при каждом последующем подвигании очистного фронта возрастают. Они начинают четко прослеживаться после подвигания фронта очистных работ на 20–30 м [10]. С этого момента происходит прямо пропорциональный пролету выработанного пространства рост максимальных величин смещений кровли, т. е. необходимо учитывать динамику деформирования пород. Статический подход продиктован неоднородной структурой массива горных пород и связывает физический механизм разрушения пород с повреждаемостью в виде трещинообразования и раскрытия существовавших в массиве трещин. Такие дефекты накапливаются при растягивающих напряжениях. Во время движения забоя на начальном этапе середина смещений кровли может образовывать раскрытую трещину. Их длина увеличивается с движением забоя, однако на статический анализ они влияют слабо. Дальнейшее подвигание забоя приводит к отклонению наблюдаемых смещений от рассчитываемых с учетом веса пород на любое фиксированное положение фронта работ. Влияние динамики, длина раскрытых трещин и их число возрастают (рис. 2).

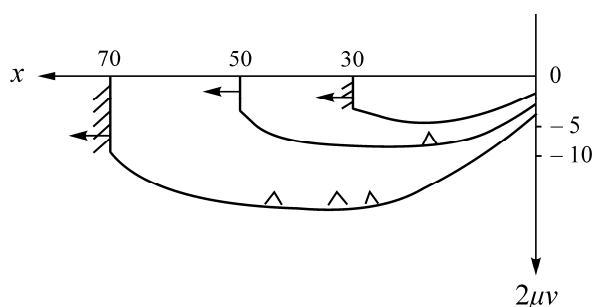


Рис. 2. Раскрытие трещин при проявлении динамики процесса

Информацию о динамике можно получить, фиксируя отпор крепи, смещения кровли на линии забоя, процесс разрушения пласта. Однозначность описания динамики, сопровождающей процесс добычи полезного ископаемого, требует рационально использовать эту информацию при математическом моделировании ситуации на конкретное положение забоя. Расчет ползучести пласта или другой экзотической аналитической возможности нельзя признать уместным, так как ползучесть происходит при низких напряжениях, когда нет пластической добавки. Теория этого параметра сводится к одномерному случаю, а сам процесс вычисления такой зависимости невозможен.

Отработка полосы расходящимися забоями формирует приращение смещений подобно закономерностям начального развития смещений для одиночного забоя. Однако начальные приращения смещений для расходящихся забоев больше. Наибольшие деформации при ведении очистных работ наблюдаются по осям симметрии очистного пространства, поэтому расходящиеся движения забоев обеспечивают быстрый доступ к более напряженному месту.

Рассмотрим модель осесимметричного нагружения многослойных пород с учетом повреждаемости их на границе раздела слоев при сильно нагруженных участках около выработки. Образование поврежденного слоя материала на стыке слоев обсуждалось в [11, 12] на некорректных примерах. На контактах слоев в окрестности выработки возникают большие нормальные и касательные напряжения, способные разрушать контактный слой, и происходит отжим пласта [13]. Учет собственного веса пород и динамическая добавка однозначно определяют наиболее напряженное место в окрестности выработки начального проскальзывания между пластом и породами кровли.

Инициатором геомеханических процессов, возникающих в окрестности выработки при ведении очистных работ, являются смещения кровли. Наиболее опасные сечения определяются максимальными смещениями кровли. В этом случае первичный фактор — растягивающие напряжения, приводящие к разрыву пород в этом сечении; вторичный — пластичность, ползучесть и приращение смещений, определяющиеся только расчетом. Следует произвести натурные замеры смещений пород кровли и почвы на определенное положение забоя. Статический расчет обеспечивает появление кинематических смещений, и последующее вычитание из полных натуральных смещений определит вклад динамической части. Поскольку динамика деформирования пород кровли связана с отработкой пласта, то в дополнение к кинематической составляющей необходимо получить экспериментальные данные о пласте: величина отжима и протяженность разрушенной части пласта, смещения кромки пласта и т. д.

Если нет отжима угля в сторону выработанного пространства, то пласт выдерживает нагрузку. Увеличение его влечет повышение максимальных значений смещений, а координата их положения сдвигается к забою.

Статические и кинематические смещения кровли выработки и их сумма не нарушают симметрию деформирования, обеспечивая возможность разрушения в двух точках независимо от принимаемой теории прочности. Каждое подвигание секции крепи приводит к передаче давления на породы кровли по отрабатываемым пластам и соседним секциям крепи, вызывая дополнительное разрушение кровли, т. е. к накоплению в ней повреждений, реализующихся в будущем. Начиная с этого момента, если учесть изменение мощности слоя в кровле выработки и разрушение пласта, симметрия напряженно-деформированного состояния исчезает. Начало разрушения всегда будет в одной точке.

Рассмотрим случай ведения очистных работ на горизонтально залегающем пласте полезного ископаемого, предусматривая выработку заглубленной. Отнесем величины, имеющие размерность длины, к мощности пласта, а размерность напряжений — к вертикальным напряжениям в нетронутом массиве в центре будущей выработки. Не уменьшая общности, положим, что вмещающие породы имеют модуль Юнга E и коэффициент Пуассона e соответственно пласта E_1 , e_1 . Граничные условия на контуре выработки для дополнительной задачи примем в виде $\sigma_y = 1$, $\sigma_x = 0.5$, а механические характеристики — $E = 10^4$, $e = 0.3$; $E_1 = 10^3$, $e_1 = 0.3$. Расчет проводился с использованием уравнений (1), (2). На контакте “пласт–порода” предполагается сцепление, т. е. непрерывность нормальных и касательных напряжений.

На рис. 3а приведены смещения кровли выработки на различные положения забоя $x = 5, 15, 25$ в условиях статического рассмотрения. Смещения кровли возрастают с увеличением очистного пространства. На рис. 3б представлены компоненты смещений пласта $v(y)$ для положения забоя $x = 5, 15, 25$, которым соответствуют кривые 1, 2, 3.

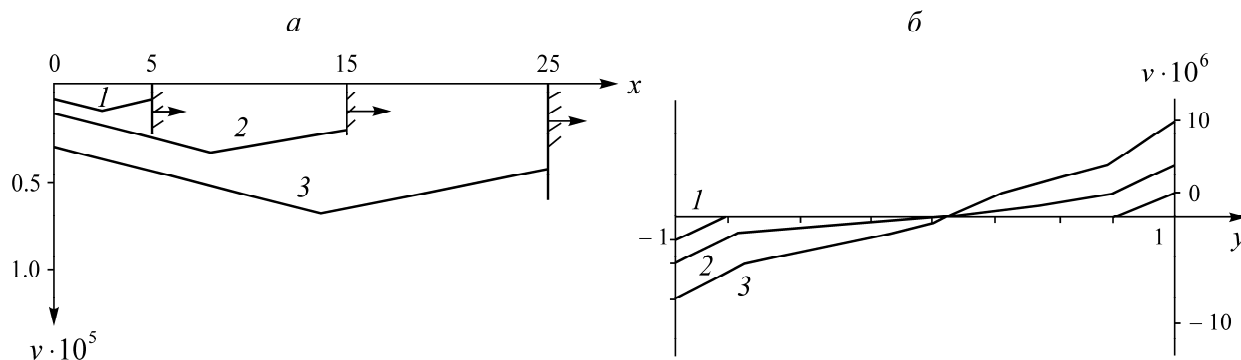


Рис. 3. Смещения кровли при ведении очистных работ (а) и компоненты смещений пласта $v(y)$ для $-1 \leq y \leq 1$ (б)

Для моделирования процесса проскальзывания по контакту “пласт–порода” на S положим, что напряжения σ_y остаются такими же, что и до проскальзывания, а касательные на S примем равными нулю. Разрезы образуем на $x=25$ и $y=1$ с помощью $S_1=0.2$ и $S_2=0.4$. Расчет проводился для полуплоскости, моделирующей породы кровли, граничные условия которой получены из решения до проскальзывания, выделяя касательные напряжения на S . Эти напряжения с обратным знаком формулируем на дополнительной полуплоскости, считая, что остальные граничные условия в напряжениях тождественно равны нулю. Анализ одной из полуплос (пласт) с аналогичными граничными условиями даст тот же результат. Полученные смещения добавляются к рассчитанным до проскальзывания.

На рис. 4 представлены результаты расчета смещений кровли выработки для случая $x=25$, $y=1$, где кривая 1 отвечает ситуации, имевшей место до проскальзывания пород кровли, а кривые 2, 3 — увеличению смещений для $S_1=0.2$ и $S_2=0.4$. Разрезы при $x=0$ и $x=25$ не влияют друг на друга. Расчеты по одному контакту для $S_1=0.2$ и $S_2=0.4$ приводят к нарушению симметрии деформирования в окрестности этого контакта и не влияют на смещения в окрестности неразрушенных трех контактов. Максимальные смещения кровли перемещаются от середины выработки к забою при возможных значениях $S_1 \neq 0$ и $S_2 \neq 0$. Чем больше проскальзывание (область разрушенного пласта), тем больше смещения в окрестности этого контакта.

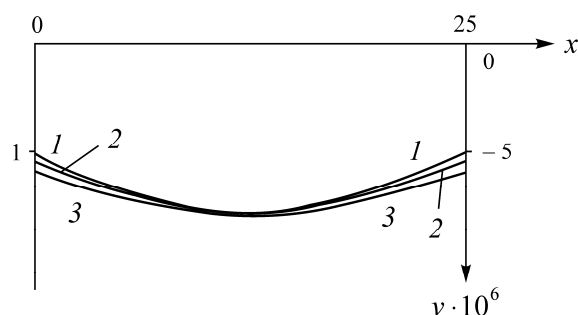


Рис. 4. Смещения кровли выработки при $x=25$: 1 — смещения до проскальзывания; 2, 3 — смещения при проскальзывании для $S_1=0.2$ и $S_2=0.4$

Предлагаемый метод прогноза горного давления при ведении очистных работ использует натурные замеры смещений. Это единственно достоверная информация, позволяющая разделить полные смещения на составляющие: статические (классический расчет), кинематические (от учета собственного веса пород) и динамические. Замеры смещений необходимо производить в окрестности линии забоя на различные дискретные положения забоя с некоторым ша-

гом. Статические и кинематические смещения можно рассчитать на любое положение забоя. Образуемая разница смещений характеризует динамическую составляющую на данное положение забоя. Соединив прямой динамические смещения для двух соседних положений забоя, найдем первое приближение замеров смещений на промежуточные положения. Чем меньше расстояние между соседними замерами полных смещений, тем больше информации получает процесс описания деформирования при ведении очистных работ. Можно оценивать не только величину смещений при движении забоя, но и скорость роста смещений от динамики. Набор статической информации для будущих очистных работ увеличивается на аналогичных участках.

На рис. 5 кривая 1 характеризует расчет смещений кровли выработки (статические плюс кинематические), кривая 2 — полные смещения, а кривая 3 — динамическую составляющую. Динамические смещения нарушают симметрию и сдвигают максимальные смещения кровли к забою. Разрушение обрабатываемого пласта в окрестности забоя приводит к увеличению смещений кровли и дополнительному сдвигу максимальных значений их к забою, повышая возможность обрушения пород. При исследовании смещений в функции от выработанного пространства должна набираться статистика, позволяющая снизить затраты на проведение мероприятий по безаварийной работе комплекса. В частности, пунктирную кривую на рис. 5 можно будет восстанавливать по одному замеру смещений на промежуточное положение забоя при $x = x_0$. Обрушение кровли предсказывают, применяя теорию прочности, не отвечающую реальному массиву пород с выработкой, а статистика поможет, просчитывая обратную задачу, определять наступление разрушения с точностью до одного подвигания очистных работ. До настоящего времени прогноз проявлений горного давления основывался на упругопластическом анализе напряженно-деформированного состояния в окрестности выработки, расчет которого сводился к некорректной формулировке задачи. Динамические смещения можно использовать для аппроксимации реакции пласта на процесс разрушения, т. е. учитывая меняющиеся значения модуля Юнга для пласта $E = E(x)$, в области влияния, предполагая дополнительную конкретную информацию (рис. 5).

Вводится новый метод расчета напряженно-деформированного состояния в окрестности очистной выработки, без которого невозможно управлять горным давлением. Впервые анализируются статический, кинематический и динамический аспекты, описывающие состояние массива пород с выработкой. Метод предлагает начать решение задач Коши с рассмотрения дополнительной задачи и исключает некорректные формулировки во всех трех аспектах проблемы.

Система интегральных уравнений (1), (2) позволяет рассчитывать деформирование пласта и пород кровли на фиксированное положение забоя, т. е. появляется возможность использовать натурные данные о сжатии пласта и смещениях кровли в анализе напряжений и смещений. В сложных случаях (например, после первой посадки кровли) необходимо проводить расчеты, применяя метод конечных элементов и соблюдая корректность реализации.

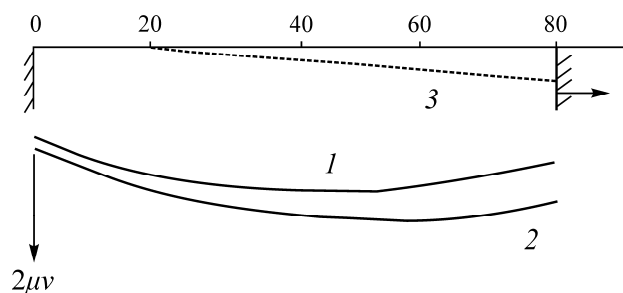


Рис. 5. Смещения кровли выработки: 1 — сумма статических и кинематических смещений; 2 — полные смещения; 3 — смещение динамическое

ВЫВОДЫ

Рассмотрен процесс смещений пород кровли при ведении очистных работ в условиях формулировки задач Коши для статики и кинематики. Установлено, что полные смещения представляют сумму статических (классический расчет), кинематических (учет собственного веса пород) и динамических (влияние подвигания забоя) подходов в квазистатической постановке, используя смещения при фиксированном положении забоя. Целесообразно проводить идентификацию параметров, характеризующих массив пород с выработкой, в начальный момент отработки пласта, когда влияние динамики вследствие горных работ наименьшее.

Учет динамической составляющей смещений нарушает симметрию деформирования массива горных пород и фиксирует потенциальную точку начала их разрушения. Проскальзывание пород кровли по пласту в окрестности очистного забоя приводит к росту вертикальных смещений и сдвигу положения их максимальных значений к забою, увеличивая возможность обрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carranza-Torres C., Rysdahe B., and Vasim M. On the elastic analysis of a circular lined tunnel considering the delayed installation of the support, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2013, Vol. 61. — P. 57–85.
2. Шапошник Ю. Н., Неверов А. А., Неверов С. А., Никольский А. Н. Оценка влияния накопившихся пустот на безопасность доработки Артемьевского месторождения // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 108–118.
3. Badrul Alam A. K. M. and Masaki Niioka Fujii. Daisuke Fukuda, Jun-ichi Kodama. Effect of confining pressure on the permeability of three rock types under compression, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2014, Vol. 65. — P. 49–61.
4. Kumar R., Singh A. K., Mishra A. K., and Singh R. Underground mining of thick coal seams, *J. Mon. Sci. Technol.*, 2015, Vol. 25, No. 6. — P. 885–896.
5. Basarir H., Oge I. F., and Aydin O. Prediction of the stresses around main and tail gates during top coal caving by 3D numerical analysis, *J. Mon. Sci. Technol.*, 2015, Vol. 25. — P. 88–97.
6. Михлин С. Г. О напряжениях в породе над угольным пластом // Изв. АН СССР ОТН. — 1942. — № 7, 8. — С. 13–28.
7. Баренблатт Г. И., Христианович С. А. Об обрушении кровли при горных выработках // Изв. АН СССР ОТН. — 1955. — № 11. — С. 73–86.
8. Курленя М. В., Миренков В. Е. Феноменологическая модель деформирования горных пород вокруг выработок // ФТПРПИ. — 2018. — № 2. — С. 3–9.
9. Миренков В. Е. О некорректных задачах геомеханики // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 3–10.
10. Грицко Г. И., Власенко Б. В., Посохов Г. Е. Прогнозирование и расчет проявлений горного давления. — Новосибирск: Наука, 1980. — 160 с.
11. Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М. Моделирование механизма движений в промежуточном слое между контактирующими телами при сдвиге со сжатием // МТТ. — 2016. — № 3. — С. 55–70.
12. Горячева Н. Г., Торская Е. В. Моделирование влияния технологии нанесения покрытий на характеристики контактного взаимодействия // МТТ. — 2016. — № 5. — С. 52–60.
13. Chen T., Wang X., and Mukerji T. In situ identification of high vertical stress areas in an underground coal mine panel using seismic refraction tomography, *J. Coal Geology*, 2015, Vol. 149. — P. 55–66.

Поступила в редакцию 20/1 2020

После доработки 31/1 2020

Принята к публикации 04/II 2020