

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОГО МАССИВА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ НА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Н. Ступник¹, В. Калиниченко¹, С. Письменный^{1*}, М. Федько¹, Е. Калиниченко¹

¹Кафедра подземной разработки месторождений полезных ископаемых, Криворожский национальный университет, Кривой Рог, Украина

*Ответственный автор: e-mail psv-knu@mail.ru, тел. +380969985358

METHOD OF SIMULATING ROCK MASS STABILITY IN LABORATORY CONDITIONS USING EQUIVALENT MATERIALS

M. Stupnik¹, V. Kalinichenko¹, S. Pysmennyi^{1*}, M. Fedko¹, O. Kalinichenko¹

¹Department of Underground Mining of Mineral Deposits, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

*Corresponding author: e-mail psv-knu@mail.ru, tel. +380969985358

ABSTRACT

Purpose. To determine the qualitative composition of the equivalent material of a laboratory model representing Kryvyi Rih iron-ore basin ground, as well as to develop a method to determine its quantitative composition for the study of the rock mass stability in the laboratory conditions with the geometric scale of similarity 1:200.

Methods. Laboratory studies on models with geometric scale of similarity 1:200 allowed to establish the dependence of the initial stress changes on the percentage of the components comprising the equivalent material.

Findings. As a result, the study found that it is expedient in laboratory conditions to replace the full-size model by the sand and paraffin-based equivalent material consisting of granite chips, cast iron, silica sand, mica and paraffin wax. It was established that the quantitative composition of the equivalent material mixture simulating rocks of Kryvyi Rih iron-ore basin consists of cast iron and granite chips (34%) and silica sand, mica and paraffin (66%).

Originality. For the first time, the empirical dependence of initial stress occurring in the equivalent material on the percentage of paraffin and iron has been set. Initial stress in the equivalent material depend directly on the amount of cast iron in the mixture and vary according to the polynomial dependence, and the amount of paraffin in the mixture varies according to the quadratic dependence.

Practical implications. The obtained results of laboratory tests can be used with sufficient accuracy for physical modeling of processes occurring in rocks during underground mining, and the resulting values of modeling can be used in the design of stopes to be developed.

Keywords: stress, equivalent material, similarity, model, scale

1. ВВЕДЕНИЕ

Шахты Криворожского железорудного бассейна осуществляют добычу богатых железных руд ниже 1135 м. С ведением горных работ на больших глубинах (ниже 1315 м) на отдельных участках резко снизились показатели извлечения горной массы. Анализ проектно-технической документации показал, что следствием снижения показателей извлечения является не только ухудшение горно-геологических условий (Stupnik, Kolosov, Kalinichenko, Pismennyi, & Fedko, 2014), а также значительное увеличение горного давления. Увеличить показатели извлечения возможно за счет изменения технологических процессов, однако необходимо на момент проектирования знать какие напряжения будут действовать в

пределах выемочного очистного блока (Stupnik, Kolosov, Kalinichenko, Pismennyi, & Shepel, 2014).

В настоящее время разработано большое количество методик и программных комплексов, которые позволяют успешно прогнозировать распределение напряжений вокруг горных выработок и очистных блоков в процессе подземной разработки железорудных месторождений Криворожского бассейна (Stupnik et al., 2015). Однако до настоящего времени они не совершенны и при их использовании возникает сложность в создании и моделировании динамической модели. Таким образом, спрогнозировать распределение напряжений в горном массиве в динамике возможно за счет применения физического лабораторного моделирования на эквивалентных материалах.

При лабораторном моделировании особенно важным является соблюдение требований о граничных условиях в модели. Также соблюдение граничных условий при решении объемных задач необходимо чтобы условия на границах исследуемого участка в модели и натуре были аналогичны, так как моделируемый участок месторождения несколько больший по сравнению с исследуемым (Stupnik, Kalinichenko, & Pismennyi, 2013).

Следует учитывать, что напряженно-деформированное состояние на границах модели значительно отличается от напряженно-деформированного состояния на границах моделируемого участка природы, так как в последнем случае имеется связь с окружающим массивом, а потому механические процессы на границах модели будут несколько отличаться от процессов, происходящих в натуре. Соблюдение граничных условий в исследуемой модели возможно за счет изменения процентного соотношения наполнителя и связывающих веществ в составе смеси эквивалентного материала.

На выбор наполнителя и связывающих веществ эквивалентного материала в первую очередь зависят физико-механические свойства исследуемых горных пород, а также соблюдение необходимых исходных характеристик согласно принятому масштабу моделирования. Чтобы приготовить качественный состав эквивалентного материала в необходимом количестве требуется значительное количество времени, материалов и трудозатрат.

Для сокращения затрат времени по изготовлению качественного состава, а также уменьшения лабораторных испытаний образцов необходимо разработать методику по определению качественного состава эквивалентного материала, который будет соответствовать материалу в натуре с учетом критерия подобия.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основой лабораторного моделирования является выбор теории подобия, масштаба модели, а также установление граничных условий объекта и модели, при которых эти процессы будут подобными. Для получения информации об изучаемом явлении исследуется некоторый вспомогательный искусственный объект (модель), имеющий определенное объективное соответствие с изучаемым объектом на отдельных этапах исследования. В классическом моделировании связывающей величиной для переменных исследуемого объекта является масштаб моделирования (Nasonov, 1978).

На основании общего определения свойств подобных физических явлений можно охарактеризовать механически подобные системы, у которых все параметры, характеризующие механические процессы, происходящие в одной системе, могут быть получены простым умножением соответствующих параметров другой системы на постоянные переходные множители. При этом параметры различной физической природы имеют различные множители, но для однотипных параметров этот множитель (константа подобия) имеет одно неизменное значение.

Вторая теорема подобия, позволяет установить возможность такого преобразования физического уравнения связи, описывать исследуемое явление, при котором получается уравнение, составленное из критериев “инвариантов” подобия:

$$l'_n / l'_m = l''_n / l''_m = \dots = l^i_n / l^i_m = M_l, \quad (1)$$

где:

l_n, l_m – линейные размеры, соответственно в модели и натуре;

M_l – некоторое безразмерное число, являющееся определяющим критерием подобия.

Для моделирования проявления горного давления на моделях из эквивалентных материалов наиболее распространенным является метод исследования, разработанный Г.Н. Кузнецовым (Kuznetsov, Budko, Filippova, & Shklyarskiy, 1959). Данный метод применяют для решения широкого круга вопросов, связанных со сдвижением пород и изменением напряженного состояния в горном массиве вокруг очистных забоев, подготовительных и капитальных выработок.

Соотношение физико-механических свойств, изготовленных из искусственных материалов, к аналогичным свойствам материала природы с учетом геометрического подобия определяют из закона динамического подобия Ньютона:

$$\frac{P_m}{\rho_m \cdot l_m^2 \cdot v_m^2} = \frac{P_n}{\rho_n \cdot l_n^2 \cdot v_n^2} = idem = M, \quad (2)$$

где:

P_m, P_n – силы, соответственно действующие в модели и натуре;

ρ_m, ρ_n – плотность материалов, соответственно модели и природы;

v_m, v_n – скорости перемещения сходственных точек, соответственно модели и природы.

Прочностные и упругие свойства, которыми должен обладать материал модели при принятом геометрическом масштабе моделирования, т.е. отношение l_m / l_n прочностных характеристиках (или модуля упругости) материала природы, а также γ_m и γ_n определяют по формулам:

$$[\sigma]_m = \frac{\gamma_m \cdot l_m}{\gamma_n \cdot l_n} \cdot [\sigma]_n; \quad (3)$$

$$E_m = \frac{\gamma_m \cdot l_m}{\gamma_n \cdot l_n} \cdot E_n, \quad (4)$$

где:

γ_m, γ_n – плотность материалов, соответственно модели и природы;

$[\sigma]_m$ – любая прочностная характеристика материала модели;

$[\sigma]_n$ – соответствующая модели характеристика материала природы;

E_m и E_n – модуль упругости материала соответственно модели и природы.

Как правило, при моделировании механических процессов, происходящих в породном массиве при ведении горных работ, должно соблюдаться подобие следующих физико-механических характеристик эквивалентного материала: прочность на сжатие, растяжение, изгиб, модуль упругости, сцепление, а также пластические и реологические характеристики, при этом следует учитывать, что угол внутреннего трения и коэффициент Пуассона по величине должны быть одинаковыми как в модели, так и в натуре.

Подобие начальных условий достигается созданием в модели копии геологического разреза пород в натуре на всю глубину от поверхности земли до места моделирования горных работ с воспроизведением в модели слоистости и различных геологических нарушений (разломов, трещиноватости и т.п.), что достигается соответствующей технологией изготовления моделей. В решении некоторых задач допускается замена верхних слоев искусственными силами (метод компенсирующей нагрузки) (Pysmennyi & Tomashevskiy, 2015).

Эквивалентные материалы по природе связующего вещества делятся на следующие группы: неорганические материалы (цемент, гипс и т.п.), обладающие хрупкими свойствами; углеводороды нефтяного происхождения (парафин, вазелин и т.п.), имеющие пластические и упругие свойства; синтетические полимеры (эпоксидная, карбамидная и другие смолы) с хрупкими и упруго-пластическими свойствами; смолы естественного происхождения (канифоль, пек и др.), относящиеся к хрупким.

Из проведенных исследований было установлено, что при определении устойчивости горного массива и напряжений вокруг горных выработок целесообразно использовать неорганические материалы, основанные на песчано-парафиновой основе (Pysmennyi & Tomashevskiy, 2015). Песчано-парафиновая основа включает в себя следующие компоненты: гранитную крошку, чугун, кварцевый песок, слюду, парафин.

Технология изготовления эквивалентного материала из песчано-парафиновой смеси заключалась в следующем: гранитную крошку, кварцевый песок и чугунную стружку высушивают, просеивают и нагревают до температуры 130°C. В соответствующих пропорциях гранитную крошку, кварцевый песок и чугунную стружку засыпают в смеситель и смешивают 10 – 15 мин. В полученную песчаную смесь засыпается заранее отвешенная размельченная порция парафина и далее перемешивается в смесителе в течение 25 – 30 мин при температуре +130 ± 3°C (Stupnik, Kolosov, Kalinichenko, Pismennyi, & Shepel, 2014).

Готовая смесь в горячем состоянии перекладывается в опалубку слоями (толщиной до 2 см) и далее производится разрыхление смеси и выравнивание слоя перед укаткой. Разглаженный слой уплотняется металлическим катком через картонный лист (давление на 1 см ширины закатываемого слоя 200 – 300 гр.). Обычно укатка происходит за 10 полных циклов (в один цикл входит прямой и обратный ход катка), при мощности укатываемого слоя в 2 см рекомендуется делать 15 полных циклов. При моделировании трещиноватого массива в процессе изготовления модели

слои рассекаются специальными ножами в соответствии с расположением естественных трещин.

Определение упругих свойств эквивалентного материала производится статическим методом на образцах с размерами 50×50×100 мм. Отношение высоты образца к длине ребра основания должно быть не менее 2 для создания в средней части нагружаемого образца равномерного одноосного напряженного состояния. На специальной установке на образец прикладывают нагрузку и равномерно увеличивают ее до момента его разрушения.

Временное сопротивление исследуемых образцов на сжатие выполняли в соответствии с принятым международным стандартом на определение прочности пород при одноосном сжатии и определяли по выражению:

$$G_{сж} = \frac{P}{S}, \quad (5)$$

где:

P – разрушающая нагрузка, Н;

S – площадь поперечного сечения образца, м².

Площадь поперечного сечения образца определяется по формуле:

$$S = b_1 \cdot b_2, \quad (6)$$

где:

b_1, b_2 – геометрические параметры образца, ширина и длина, см.

Для определения деформационных характеристик необходимо замерять деформации образцов при испытаниях в продольном и поперечном направлениях действия нагрузки. Образцы испытывали при различных стадиях нагружения (через 10 – 15% от нагрузки, разрушающей образец). Для обеспечения стабильности условий на контактах образца с плитами пресса начальная нагрузка, создающая начальное напряжение σ_0 , не должна превышать 5 – 10% от нагрузки, разрушающей образец.

На каждой ступени нагрузки сразу после ее приложения фиксируются деформации образца в продольном (Δh) и поперечном (Δb) направлениях и рассчитывается коэффициент относительной поперечной деформации образцов:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{b_i}}{\varepsilon_{h_i}} = \frac{h \cdot (\Delta b_i - \Delta b_0)}{b \cdot (\Delta h_i - \Delta h_0)}, \quad (7)$$

где:

h и b – первоначальные высота и ширина образца, см;

Δh_0 и Δb_0 – соответственно продольная и поперечная деформации образца при начальном напряжении σ_0 .

Модуль упругости определяется по выражению:

$$E = \frac{h \cdot (\sigma_i - \sigma_0)}{\Delta h_{0_i}}, \quad (8)$$

где:

σ_i и σ_0 – напряжения соответственно в образце при i -й ступени нагружения и первоначальное в образце, кг/см²;

Δh_{0i} – деформация образца после разгрузки до начального напряжения σ_0 , определяется по формуле:

$$\Delta h_{0i} = h_{0i} - h_i, \quad (9)$$

где:

h_{0i} – высота образца при i -й ступени нагружения;

h_i – высота образца после снятия нагрузки до начального напряжения σ_0 .

Для определения качественного состава эквивалентного материала для железистых кварцитов было приготовлено более 100 лабораторных образцов. Масштаб моделирования при определении песчано-парафиновой смеси был принят 1:200.

В процессе испытаний приготовленных образцов из эквивалентных материалов были построены зависимости по определению количественного состава эквивалентного материала от физико-механических свойств, которыми должна обладать песчано-парафиновая смесь (Рис. 1).

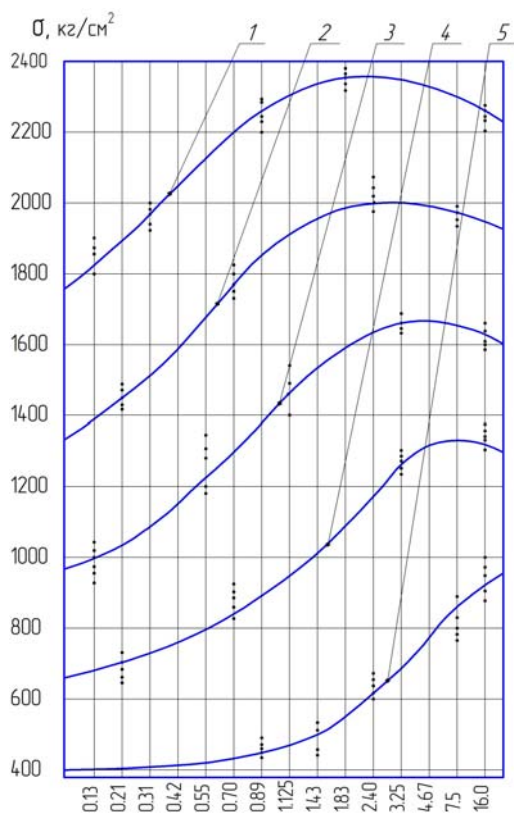


Рисунок 1. Зависимости первоначального давления в модели от количественного соотношения чугуна и гранитной крошки входящих в состав эквивалентного материала: 1, 2, 3, 4, 5 – состав парафина соответственно 2.4, 2.2, 2.0, 1.8 и 1.6%

Следует отметить, что количество чугуна и гранитной крошки при моделировании составляет 34%, а кварцевого песка, слюды и парафина 66%. В процессе обработки полученных в лабораторных условиях значений первоначального поля напряжений в исследуемом массиве определяли среднее квадратическое отклонение и степень неоднородности массива (Табл. 1).

Согласно утвержденной методики обработки лабораторных экспериментов, среднее квадратическое отклонение не должно превышать 15% от усредненных данных, а степень неоднородности массива полученных значений должно быть не более чем 25.

Таблица 1. Результаты обработки полученных значений первоначального поля напряжений и состава песчано-парафиновой смеси

Наименование	Количество парафина в песчано-парафиновой смеси, %				
	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
Среднеквадратическое отклонение	22 – 91	32 – 123	30 – 77	33 – 110	90 – 135
Степень неоднородности массива	4.4 – 18.2	4.9 – 13.7	0.8 – 8.0	1.5 – 6.4	0.6 – 7.0

Несмотря на значительную разбегку полученных данных (Табл. 1), среднее квадратическое отклонение составляет 5 – 7%, а максимальное значение степени неоднородности массива составляет 18.2.

Таким образом, считаем, что полученные результаты в процессе моделирования являются достоверными и могут использоваться при разработке методики моделирования устойчивости горного массива в лабораторных условиях на эквивалентных материалах для условий Криворожского железорудного бассейна.

В результате установления качественного состава эквивалентного материала были получены эмпирические зависимости по определению внешней нагрузки, модуля упругости и коэффициента Пуассона от количественного состава чугуна, гранита и парафина.

Так, начальное давление (напряжение), возникающее в массиве эквивалентного материала, определяется по формуле:

$$\sigma = A \cdot x^4 + B \cdot x^3 + C \cdot x^2 + D \cdot x + E, \quad (10)$$

где:

A, B, C, D, E – действительные числа, которые определяются эмпирическими выражениями (Табл. 2);

x – количество чугуна в составе эквивалентного материала.

Таблица 2. Эмпирические уравнения действительных чисел входящих в уравнение (10)

Параметр	Формула
A	$0.0560 - 0.0018 \cdot \xi$
B	$0.0624 \cdot \xi - 0.3187$
C	$2.9441 \cdot \xi^2 - 9.0704 \cdot \xi + 11.7490$
D	$-143.43 \cdot \xi^2 + 476.2 \cdot \xi - 395.77$
E	$1383.7 \cdot \xi^2 - 6947.3 \cdot \xi + 9346.1$

* ξ – процентное количество парафина в песчано-парафиновой смеси (по данным моделирования принимается от 1.6 до 2.4), %.

После преобразования формулы (10) получаем окончательное уравнение по определению первоначальных напряжений в зависимости от количественного состава гранитной крошки и парафина в виде:

$$\sigma = x^2 \cdot (A \cdot x^2 + C) + x \cdot (B \cdot x^2 + D) + 1383.7 \cdot \xi^2 - 6947.3 \cdot \xi + 9346.1 \quad (11)$$

На основании полученной формулы (11) было изготовлено 30 образцов. В результате проведения лабораторных исследований было установлено, что погрешность в результатах не превышает 5 – 7%.

В процессе исследований зачастую необходимо подобрать состав смеси по известным исходным характеристикам горного массива. По формулам (2) – (4) определяем необходимые характеристики эквивалентного материала, с учетом масштаба подобия исследуемой системы. Определив по выражению (3) необходимые напряжения в исследуемой модели, по эмпирическим формулам подбираем качественный состав эквивалентного материала (Табл. 3).

Таблица 3. Эмпирические уравнения по определению количества чугуна в песчано-парафиновой смеси

Количественный состав парафина, %	Формула
2.4	$K_q = 0.0274 \cdot [\sigma]_M - 45.485$
2.2	$K_q = 0.0270 \cdot [\sigma]_M - 33.347$
2.0	$K_q = 0.0288 \cdot [\sigma]_M - 24.698$
1.8	$K_q = 0.0353 \cdot [\sigma]_M - 18.748$
1.6	$K_q = 0.0603 \cdot [\sigma]_M - 17.626$

Результатами лабораторных исследований было установлено, что процентное соотношение веществ входящих в песчано-парафиновую смесь существенно влияют на физико-механические свойства эквивалентного материала.

В результате лабораторных испытаний образцов, кроме первоначального поля напряжений определяли коэффициент Пуассона и модуль Юнга различных типов песчано-парафиновой смеси.

Зная из условия подобия первоначальное поле напряжений в исследуемом массиве, а также качественный состав эквивалентного материала, по формулам приведенным в Таблице 4 определяем коэффициент Пуассона и модуль Юнга песчано-парафиновой смеси.

Среднеквадратическое отклонение результатов лабораторных экспериментов в зависимости от качественного состава песчано-парафиновой смеси составляет 3 – 10%, а максимальное значение степени неоднородности массива составляет 7.96.

Таким образом, полученные эмпирические уравнения являются достоверными и могут использоваться при определении качественного состава эквивалентного материала в лабораторных условиях для условий Криворожского железорудного бассейна.

3. ВЫВОДЫ

В процессе лабораторных исследований разработана методика по определению количественного и качественного состава эквивалентного материала. Установлено, что количественный состав смеси эквивалентного материала в песчано-парафиновой основе, имитирующей горные породы Криворожского железорудного бассейна состоит из: чугуна и гранитной крошки на 34%, а кварцевого песка, слюды и парафина на 66%.

Таблица 4. Эмпирические уравнения по определению коэффициента Пуассона и модуля Юнга в песчано-парафиновой смеси

Количественный состав парафина, %	Формула
2.4	$\mu = 675.54 \cdot K_q^{0.3996}$
	$E = 0.2739 \cdot K_q^{0.1515}$
2.2	$\mu = 380.45 \cdot K_q^{0.5342}$
	$E = 0.209 \cdot K_q^{0.1929}$
2.0	$\mu = 222.49 \cdot K_q^{0.6454}$
	$E = 0.1468 \cdot K_q^{0.2457}$
1.8	$\mu = 159.64 \cdot K_q^{0.6467}$
	$E = 0.0905 \cdot K_q^{0.3249}$
1.6	$\mu = 94.524 \cdot K_q^{0.7142}$
	$E = 0.0554 \cdot K_q^{0.379}$

Данная методика позволяет для заданных физико-механических свойств модели определить процентное соотношение компонентов входящих в эквивалентный материал при масштабе моделирования 1:200.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Данные исследования выполнены благодаря исходной информации, представленной горнодобывающими предприятиями Криворожского железорудного бассейна, в частности “Евраз Сухая Балка” и “Центральный ГОК”.

REFERENCES

- Kuznetsov, G., Budko, M., Filippova, A., & Shklyarskiy, M. (1959). *Izuchenie proyavleniy gornogo davleniya na modelyakh*. Moskva: Ugletehzdat.
- Nasonov, I. (1978). *Modelirovanie gornyykh protsessov*. Moskva: Nedra.
- Stupnik, N., Kalinichenko, V., & Pismennyi, S. (2013). Pillars Sizing at Magnetite Quartzites Room-Work. *Mining of Mineral Deposits*, 11-15. <http://dx.doi.org/10.1201/b16354-4>
- Stupnik, M., Kalinichenko, V., Pismennyi, S., Kalinichenko, O., Muzika, I., & Fed'ko, M. (2015). The Research of Strain-Stress State of Magnetite Quartzite Deposit Massif in the Condition of Mine “Gigant-Gliboka” of Central Iron Ore Enrichment Works (CGOK). *Metallurgical and Mining Industry*, (7), 377-383.
- Stupnik, N.I., Kolosov, V.A., Kalinichenko, V.O., Pismennyi, S.V., & Fedko, M.B. (2014). Testing Complex-Structural Magnetite Quartzite Deposits Chamber System Design Theme. *Metallurgical and Mining Industry*, (2), 89-93.
- Stupnik, N.I., Kolosov, V.A., Kalinichenko, V.O., Pismennyi, S.V., & Shepel, A.I. (2014). Modeling of Stopes in Soft Ores During Ore Mining. *Metallurgical and Mining Industry*, (3), 32-36.
- Pismennyi, S., & Tomashevskiy, O. (2015). Modeliuvannia stiikoi formy ochysnoi kamery pry rozrobttsi mahnetyovykh kvartsytyv Kryvorizkoho zalizorudnoho baseinu. *Visnyk Kryvorizkoho Natsionalnoho Universytetu*, (40), 98-104.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Определить качественный состав эквивалентного материала лабораторной модели, отражающей горный массив Криворожского железорудного бассейна, а также разработать методику по определению его количественного состава при исследовании устойчивости горного массива в лабораторных условиях с геометрическим масштабом подобия 1:200.

Методика. Лабораторными исследованиями на моделях с геометрическим масштабом подобия 1:200 установлена зависимость изменения первоначальных напряжений от процентного соотношения компонентов, входящих в эквивалентный материал.

Результаты. В результате исследований установлено, что натуральную модель целесообразно в лабораторных условиях заменять эквивалентным материалом на песчано-парафиновой основе, состоящей из гранитной крошки, чугуна, кварцевого песка, слюды и парафина. Установлено, что количественный состав смеси эквивалентного материала, имитирующий горные породы Криворожского железорудного бассейна, составляет чугун и гранитная крошка в объеме 34%, а кварцевый песок, слюда и парафин – 66%.

Научная новизна. Впервые установлена эмпирическая зависимость первоначальных напряжений, возникающих в эквивалентном материале от процентного количества парафина и чугуна. В эквивалентном материале первоначальные напряжения зависят непосредственно от количества чугуна в составе смеси и изменяются по полиномиальной зависимости, а количество парафина в смеси – по квадратической.

Практическая значимость. Полученные результаты лабораторных исследований с достаточной точностью могут использоваться при физическом моделировании процессов, происходящих в горных породах при подземной разработке месторождений, а полученные в результате моделирования значения – при проектировании обрабатываемых очистных блоков.

Ключевые слова: напряжение, эквивалентный материал, подобие, модель, масштаб

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Визначити якісний склад еквівалентного матеріалу лабораторної моделі, що відображає гірський масив Криворізького залізорудного басейну, а також розробити методику визначення його кількісного складу при дослідженні стійкості гірського масиву в лабораторних умовах з геометричним масштабом подібності 1: 200.

Методика. Лабораторними дослідженнями на моделях з геометричним масштабом 1:200 встановлена залежність зміни початкових напружень від процентного співвідношення компонентів, які входять до еквівалентного матеріалу.

Результати. За результатами досліджень встановлено, що натуральну модель у лабораторних умовах доцільно замінювати еквівалентним матеріалом на піщано-парафіновій основі, яка складається із гранітної крихти, чавуну, кварцового піску, слюди й парафіну. Встановлено, що кількісний склад суміші еквівалентного матеріалу, що імітує гірські породи Криворізького залізорудного басейну, становить чавун і гранітна крихта в об'ємі 34%, а кварцовий пісок, слюда й парафін – 66%.

Наукова новизна. Вперше встановлена емпірична залежність первинних напружень, виникаючих в еквівалентному матеріалі від процентної кількості парафіну й чавуну. В еквівалентному матеріалі початкові напруження залежать безпосередньо від кількості чавуну в складі суміші та змінюються за поліноміальною залежністю, а кількість парафіну в суміші – за квадратичною.

Практична значимість. Отримані результати лабораторних досліджень з достатньою точністю можуть використовуватися при фізичному моделюванні процесів, що відбуваються у гірських породах при підземній розробці родовищ, а отримані значення в результаті моделювання можна використовувати при проектуванні очистних блоків, що відробляються.

Ключові слова: напруження, еквівалентний матеріал, подоба, модель, масштаб

ARTICLE INFO

Received: 15 June 2016

Accepted: 27 July 2016

Available online: 30 September 2016

ABOUT AUTHORS

Mykola Stupnik, Doctor of Technical Sciences, Rector of the Kryvyi Rih National University, 11 Matusyevycha St, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine. E-mail: kpvp@hotmail.com

Vsevolod Kalinichenko, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Underground Mining of Mineral Deposits, Kryvyi Rih National University, 11 Matusyevycha St, 2/219, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine. E-mail: vsevolod921@mail.ru

Serhii Pysmennyi, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Underground Mining of Mineral Deposits, Kryvyi Rih National University, 11 Matusyevycha St, 2/219, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine. E-mail: psv-knu@mail.ru

Mykhailo Fedko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Underground Mining of Mineral Deposits, Kryvyi Rih National University, 11 Matusyevycha St, 2/219, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine. E-mail: fedkomb@i.ua

Olena Kalinichenko, Candidate of Economic Sciences Assistant Professor of the Department of Underground Mining of Mineral Deposits, Kryvyi Rih National University, 11 Matusyevycha St, 2/219, 50027, Kryvyi Rih, Ukraine. E-mail: elenakalinichenko_v@mail.ru