

УДК 622.273.216

Кошка А.Г., канд. техн. наук,
Малашкевич Д.С., аспирант,
Щелканов Р.Р.
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВ САМОТЕЧНОГО ДВИЖЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ШАХТНЫХ ПОРОД

Кошка О.Г., канд. техн. наук,
Малашкевич Д.С., аспирант,
Щелканов Р.Р.
(Державний ВНЗ «НГУ»)

ДОСЛІДЖЕННЯ КУТІВ САМОПЛИВНОГО РУХУ ТА КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕРТЯ КОВЗАННЯ ШАХТНИХ ПОРІД

Koshka A.G., PhD. (Tech.),
Malashkevych D.S., Doctoral Student,
Schelkanov R. R.
(State H E I «NMU»)

INVESTIGATION OF GRAVITY MOTION ANGELS AND SLIDING FRICTION COEFFICIENTS OF THE MINE ROCKS

Аннотация. В статье приведены результаты лабораторных исследований углов самотечного движения и коэффициентов трения скольжения шахтных пород по двум различным поверхностям, в качестве которых использовалась нержавеющая и эмалированная сталь. Представлены данные основных физико-механических свойств пород отобранных при проведении одного из штреков ОДО «Шахта «Белозерская». На основе метода планирования эксперимента установлено необходимое количество опытов для получения достоверных результатов. Приводится описание лабораторной установки для изучения закономерностей движения различных закладочных материалов под действием собственного веса. Получены зависимости изменений минимальных углов самотечного движения и коэффициентов трения скольжения от гранулометрического состава и влажности пород, а также типа используемой поверхности скольжения.

Ключевые слова: оставление пород, коэффициент трения скольжения, планирование эксперимента, поверхность скольжения.

Ежегодно при разработке угольных месторождений Украины подземным способом на поверхность выдается, около 40 млн. т породы, которая складировается в отвалы разной формы и размеров. Техногенные отходы занимают огромные площади плодородных земель и являются источником ухудшения экологического состояния в угледобывающих регионах.

Одним из способов решения сложившейся проблемы может служить оставление пустых пород в шахте.

Использование породы от внутришахтных источников для возведения закладочных массивов способствует эффективной охране и поддержанию горных выработок, минимизируя негативные проявления горного давления [1].

Технологии закладочных работ достаточно известны в мире. Основными видами закладки, применяемыми на горнодобывающих предприятиях, являются: самотечная, механическая, гидравлическая и пневматическая. Однако многие из них имеют ограниченное применение в основном по причине высокой стоимости, недостаточного технического совершенства и сложности выполнения операций. Наименее затратным и трудоемким является самотечный способ закладки выработанного пространства, который не требует дополнительной механизации, людских и материальных ресурсов [2].

Однако область применения самотечного способа ограничена круто-наклонными и крутыми пластами. Использование же предлагаемого способа размещения пустых пород в выработанном пространстве на наклонных и пологих пластах сдерживают силы трения, возникающие между перемещаемым материалом и поверхностью скольжения. Основной их характеристикой является коэффициент трения μ .

В справочной литературе можно найти величины коэффициентов трения для соответствующих пар трущихся материалов, однако представленные данные не учитывают многих факторов, таких как: гранулометрический состав сыпучего материала, его влажность, тип поверхности скольжения. Недостаточные и недостоверные сведения о фрикционных характеристиках, в качестве которого рассматривается шахтная порода, получаемая при проведении горных выработок и от присечек в очистных забоях, ограничивает область применения самотечного способа закладки на угольных шахтах.

Цель данной работы – установить зависимость значений минимальных углов самотечного движения и коэффициента трения скольжения шахтной породы от ее свойств и типа используемой поверхности скольжения.

В качестве закладочного материала использована шахтная порода полученная при проходке 1 южного вентиляционного штрека бремсберга №3, пл 1₈ гор. 550м ОДО «Шахта «Белозерская».

Отбор проб породы производился непосредственно в шахте. Все операции по отбору, консервации, транспортированию и хранению образцов горных пород выполнялись согласно ГОСТ 12071-2000. Непосредственно в шахтных условиях для получения однородных классов по крупности производился рассев материала на ситах с диаметрами отверстий 2, 5, 7, 10, 20, 40, 60 и 100 мм. В результате установлено, что максимальная крупность куска породы при проходке штрека комбайном ГПКС не превышает 150 мм. Каждый класс отсеянных пород распределялся по отдельным контейнерам с соответствующими записями на корпусе. Приготовленные пробы пород для сохранения их первоначальной влажности выносились из забоев в герметичных, непрозрачных контейнерах. Распределение пород по крупности представлены в виде гистограммы на рис. 1.

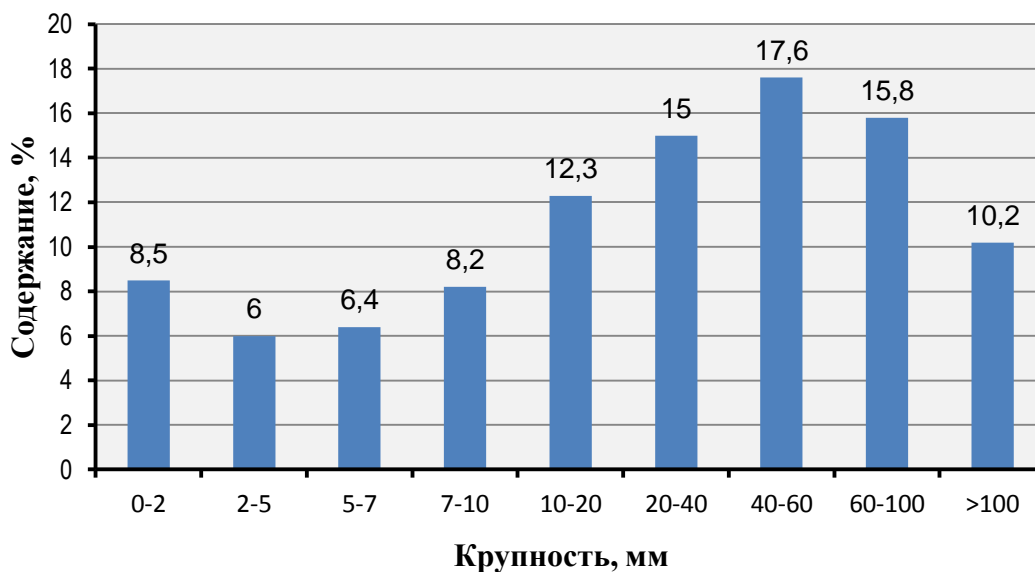


Рисунок 1 - Распределение пород по крупности

Отобранные породы представлены в основном аргиллитами (80%) и алевролитами. Коэффициент крепости аргиллитов составляет $f = 2-3$, алевролитов $f = 3-4$ по шкале М.М. Протоdjяконова. В табл. 1, приведены основные физико-механические свойства отобранных пород.

Таблица 1 – Основные физико-механические свойства отобранных пород

Наименование показателей	Значения
Петрографический состав, %	
- аргиллиты	80
- алевролиты	20
Плотность, т/м ³	2,4-2,5
Насыпная объемная масса, т/м ³	1,45-1,55
Содержание горючих веществ, %	5-7
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	
- аргиллиты	21-31
- алевролиты	30-39
Угол естественного откоса, град	36-42

Для описания формы куска использовалась методика [3], основанная на отношении длины и ширины куска породы относительно ширины D/S и H/S , где D – длина (наибольший размер), S – ширина (средний размер) и H – ширина (наименьший размер). Размеры определяются по трем взаимно перпендикулярным направлениям.

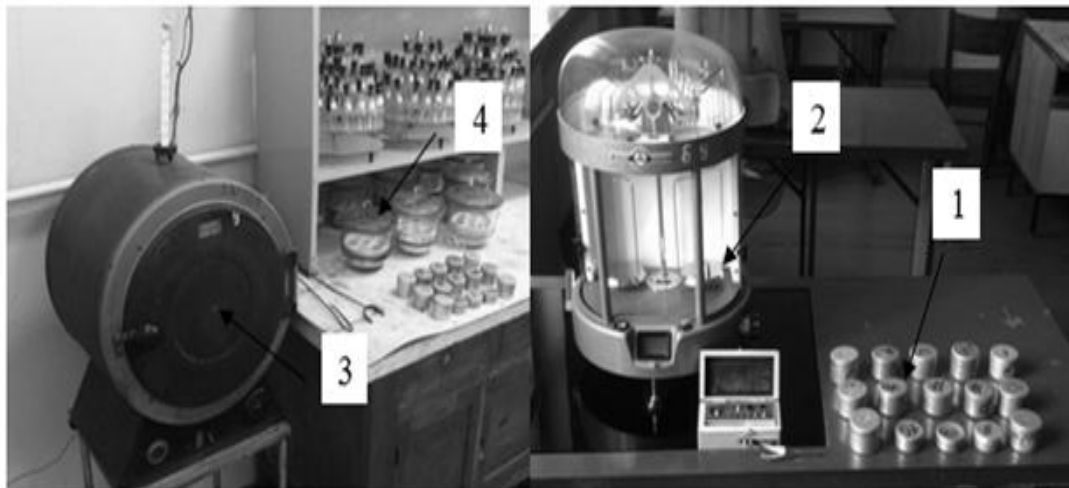
В зависимости от их значения, куски породы подразделяются на шесть типовых форм:

- 1) кубическая: $D/S = 1...1,3$, $H/S = 0,7...1$;
- 2) плитчатая: $D/S = 1...1,3$, $H/S = 0,3...0,7$;

- 3) пластинчатая: $D/S \ 1...1,3$, $H/S = < 0,3$;
- 4) столбчатая: $D/S > 1,3$, $H/S = 0,7...1$;
- 5) удлиненно-плитчатая: $D/S > 1,3$, $H/S = 0,3...0,7$;
- 6) удлиненно-пластинчатая: $D/S > 1,3$, $H/S < 0,3$.

Исходя из приведенной классификации, в большинстве случаев образцы отобранной породы имеют удлиненно-плитчатую (54%), реже плитчатую (22%), кубическую (11%) и столбчатую (8%) форму, остальные 5% приходится на пластинчатую и удлиненно-пластинчатую форму.

Определение естественной влажности отобранной шахтной породы проводилось на кафедре химии «Национального горного университета». Влажность отобранных проб определялась весовым способом согласно ГОСТ 28268-89. Используемое лабораторное оборудование представлено на рис. 2.



1- набор бьюксов; 2- аналитические весы; 3-сушильный шкаф; 4 эксикатор

Рисунок 2 –Лабораторное оборудование для определения влажности пород

Данный способ основывается на разности массы пробы до высушивания и после. Исследуемая шахтная порода помещалась отдельными порциями в алюминиевые бьюксы 1, массы которых определяли заранее. Все взвешивания проводились на аналитических весах с точностью до 0,001 г. Затем бьюксы с пробой помещались в сушильный шкаф 3, где выдерживались при $t = 100-105^{\circ}\text{C}$ в течение 1-2 ч. После просушивания бьюксы охлаждались в эксикаторе 4, на дне которого находился хлористый кальций (в течение 30-40 мин). Влажность образцов рассчитывалась по формуле

$$W = \frac{g_1 - g_2}{g_2 - g_0} \cdot 100, \% \quad (1)$$

где g_1 – масса бьюкса с крышкой и грунтом до высушивания, г; g_2 – масса бьюкса

с грунтом, после высушивания до постоянной массы, г; g_0 – масса бюкса с крышкой без грунта, г.

В таблице 2 представлены результаты вычислений естественной влажности шахтной породы по классам.

Таблица 2 – Естественная влажность исследуемой шахтной породы

Крупность породы, мм	0-2	2-5	5-7	7-10	10-20	20-40	40-60	60-100
Влажность, %	3,15	3,04	2,68	2,52	2,11	1,83	1,64	1,21

Из табл. 2 видно, что естественная влажность отобранных пород незначительна и составляет от 1,21 до 3,15%, что ограничивает границы исследуемых зависимостей. Поэтому для проведения экспериментальных исследований по изучению фрикционных характеристик пород дополнительно подготавливались образцы крупностью от 5 до 20 мм с различной влажностью от 1 до 20%.

Коэффициенты трения скольжения для различных пар трущихся материалов определялись опытным путем на специально созданном стенде для изучения закономерностей движения различных закладочных материалов под действием собственного веса. Общий вид стенда представлен на рис. 3.

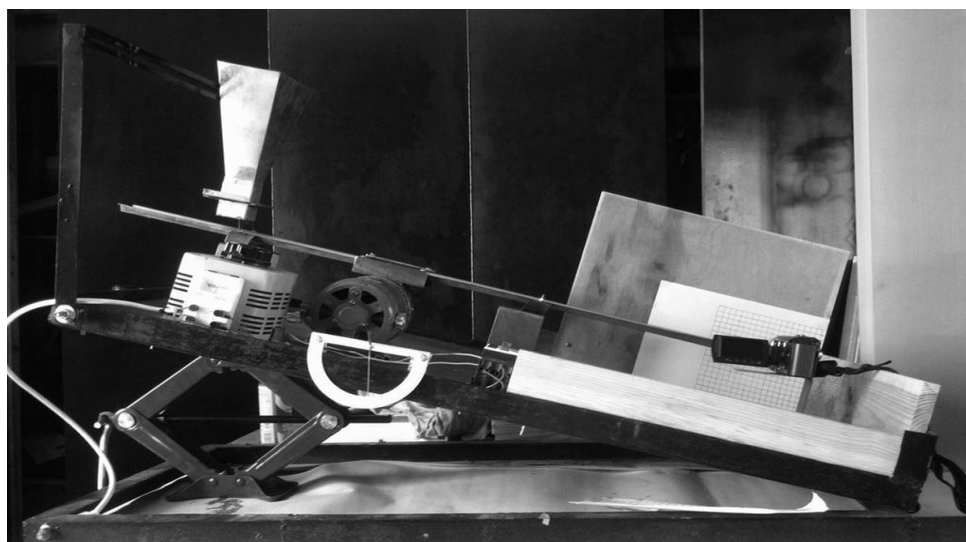


Рисунок 3 – Общий вид стенда для исследования коэффициентов трения скольжения

Лабораторная установка представляет собой наклонную платформу, на которой устанавливают сменные поверхности скольжения, с прикрепленным на ней угломером с классом точности прибора – 2. В качестве поверхности скольжения использовалась нержавеющая и эмалированная сталь.

Конструкция стенда позволяет регулировать углы наклона платформы в диапазоне от 0 до 90°. Рукояткой домкрата производят плавное изменение угла наклона платформы до 45°. В конце поверхности скольжения установлен породный ящик, который служит для сбора и предотвращения вылета кусков по-

роды за пределы установки.

Для определения начальных углов скольжения платформу устанавливали в горизонтальное положение и размещали на поверхности скольжения испытуемый образец породы. Ручкой домкрата плавно и без рывков увеличивали угол наклона платформы до начала равномерного его движения по поверхности скольжения, измеряя при этом время прохождения каждым образцом участка фиксированной длины.

Коэффициент трения скольжения определялся по формуле

$$\mu_{ск} = tg \alpha - \frac{2L}{g t^2 \cos \alpha}, \quad (2)$$

где α – угол наклона плоскости, град; L – путь пройденный образцом, м; t – время прохождения образцом пути, с.

При проведении опытов особое внимание уделялось виду движения каждого единичного образца по наклонной поверхности скольжения. Результаты считались не верными, в случае перекатывания образца по поверхности, т.е. в том случае, когда трение скольжения переходило в трение качения.

Необходимое количество дополнительных опытов, подтверждающее достоверность полученных результатов определялось по установочной серии предварительных опытов, используя выражение

$$N = t_{\alpha}^2 \left(\frac{\eta}{g} \right)^2, \text{ раз} \quad (3)$$

где t_{α}^2 – коэффициент Стьюдента; η – коэффициент вариации, %; g – допустимое отклонение.

Коэффициент вариации определялся по следующей формуле

$$\eta = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100, \% \quad (4)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение из серии опытов; \bar{x} – среднеарифметическое значение величины.

Среднеарифметическое значение искомой величины определяется по формуле

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \text{ град} \quad (5)$$

Среднее квадратичное отклонение одного опыта из серии определялось по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

Используя коэффициент вариации, характеризующий надежность полученных значений при принятой точности $P = 0,9$, определялось приближенное значение искомой величины

$$x = \bar{x} \pm t_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{m}}, \text{ град} \quad (7)$$

Исходя из предварительной выборки значений начальных углов скольжения исследуемых образцов – x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 в зависимости от ее крупности и типа поверхности скольжения, установлено необходимое число дополнительных опытов, которое выполнялось для каждого варианта. Требуемое количество опытов для каждой серии экспериментов при допустимой ошибке измерений 10% приведено в табл. 3.

Таблица 3 – Количество опытов N для получения достоверных результатов эксперимента

Крупность, мм	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	$\eta, \%$	N, раз
0-2	$\frac{29}{26}$	$\frac{32}{26}$	$\frac{31}{27}$	$\frac{30}{28}$	$\frac{29}{27}$	$\frac{1,72}{1,24}$	$\frac{14}{7}$
	$\frac{24}{20}$	$\frac{25}{19}$	$\frac{24}{21}$	$\frac{26}{19}$	$\frac{24}{20}$	$\frac{1,45}{1,69}$	$\frac{9}{12}$
2-5	$\frac{22}{18}$	$\frac{24}{17}$	$\frac{23}{28}$	$\frac{22}{19}$	$\frac{23}{17}$	$\frac{1,46}{1,88}$	$\frac{10}{16}$
	$\frac{22}{17}$	$\frac{22}{17}$	$\frac{23}{17}$	$\frac{24}{18}$	$\frac{22}{17}$	$\frac{1,58}{1,04}$	$\frac{11}{5}$
5-7	$\frac{23}{18}$	$\frac{24}{19}$	$\frac{22}{18}$	$\frac{23}{18}$	$\frac{22}{17}$	$\frac{1,46}{1,57}$	$\frac{10}{11}$
	$\frac{24}{18}$	$\frac{23}{19}$	$\frac{22}{19}$	$\frac{24}{20}$	$\frac{24}{19}$	$\frac{1,52}{1,48}$	$\frac{10}{10}$
7-10	$\frac{24}{20}$	$\frac{23}{20}$	$\frac{23}{19}$	$\frac{25}{18}$	$\frac{24}{19}$	$\frac{1,4}{1,74}$	$\frac{9}{13}$
	$\frac{25}{20}$	$\frac{23}{20}$	$\frac{25}{19}$	$\frac{25}{19}$	$\frac{24}{20}$	$\frac{1,46}{1,11}$	$\frac{9}{6}$
10-20	$\frac{25}{20}$	$\frac{23}{20}$	$\frac{25}{19}$	$\frac{25}{19}$	$\frac{24}{20}$		

В числителе – значения для нерж. стали, в знаменателе – эмалированной стали

После подстановки соответствующих величин в формулу (7) получим

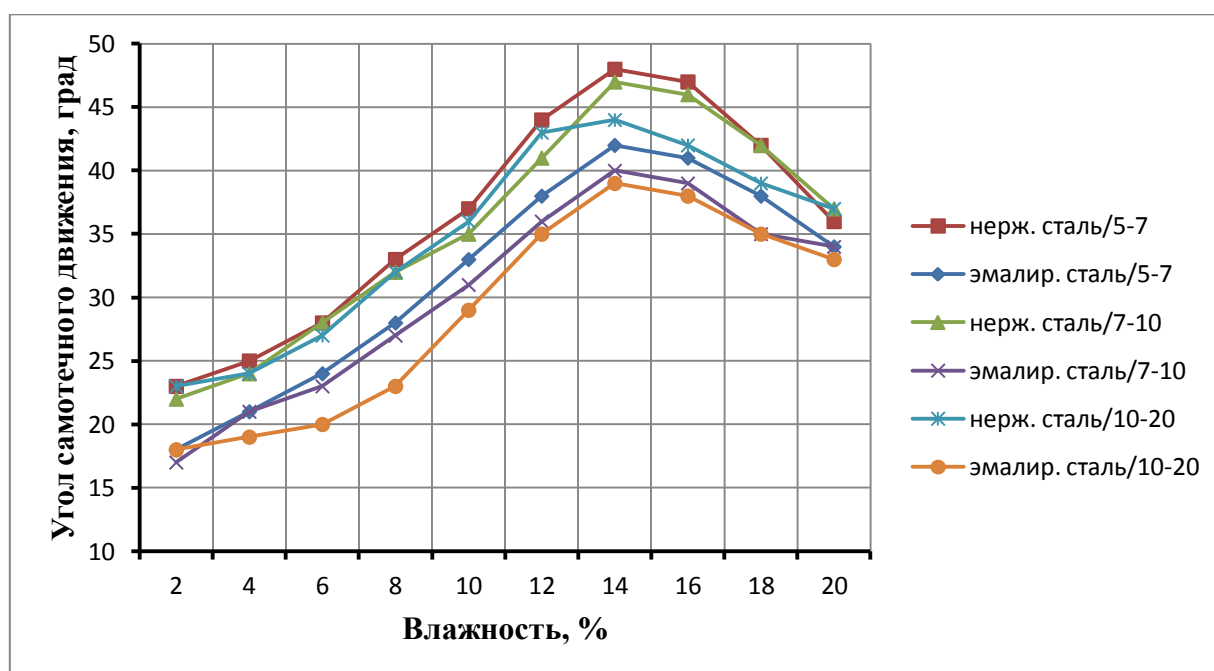
$$x = \bar{x} \pm 0,5$$

Таким образом, для получения достоверных результатов необходимо было

произвести от 6 до 16 опытов для каждого класса пород, при этом погрешность измерений оставляла 30 угловых минут.

Ниже приведены результаты лабораторных исследований минимальных углов самотечного движения и коэффициенты трения скольжения отобранных образцов шахтной породы по двум различным типам поверхности скольжения принятых к рассмотрению.

На рис. 4 представлен график изменения минимального угла самотечного движения образцов породы, в зависимости от ее класса крупности и влажности, а также типа используемой поверхности скольжения.



В числителе – поверхность скольжения, знаменателе – крупность породы, мм

Рисунок 4 – График зависимости угла самотечного движения образцов от крупности породы ее влажности и типа используемой поверхности

Как показали результаты экспериментов, минимально возможный угол самотечного движения породы составляет $18^{\circ}00' \pm 30'$, что обеспечивается при влажности породы 2%, крупностью 10-20 мм и использования в качестве поверхности скольжения эмалированной стали. Для нержавеющей стали этот показатель равен $23^{\circ}00' \pm 30'$. При увеличении крупности исследуемого материала, минимальный угол самотечного движения породы по принятой поверхности скольжения уменьшается. Разница между его значениями для крупного класса (60-100 мм) и мелких (0-2 мм) фракций составляет: для нержавеющей стали – $4^{\circ}00' \pm 30'$, для эмалированной поверхности – $7^{\circ}30' \pm 30'$.

С ростом влажности исследуемой породы минимальный угол самотечного движения увеличивается, причем максимальные его значения достигаются при влажности 12-15%. Дальнейшее повышение влажности приводит к размоканию породы, которая переходит в состояние текучести, при этом значение минимального угла самотечного движения по поверхности скольжения снижается на

5-10%. Переувлажнение пород вызывает образование «водяной подушки», которая играет роль смазки между породой и поверхностью скольжения.

Исследованиями установлено, что при влажности шахтной породы 13-14% наблюдаются наибольшие значения углов, при которых обеспечивается движение материала под действием собственного веса, так для нержавеющей стали этот показатель составляет $47^{\circ}00' \pm 30'$, эмалированной - $42^{\circ}00' \pm 30'$.

Породная мелочь, крупностью 0-5 мм при увлажнении проявляет свои адгезионные свойства даже при незначительном увлажнении, прилипая к поверхности, тем самым вызывая затруднения в проведении опытов. Данный класс пород заслуживает отдельных исследований, поэтому в данной статье экспериментальные результаты по этому классу не приведены.

На рис. 5 представлены изменения значения коэффициента трения скольжения от гранулометрического состава и типа поверхности скольжения.

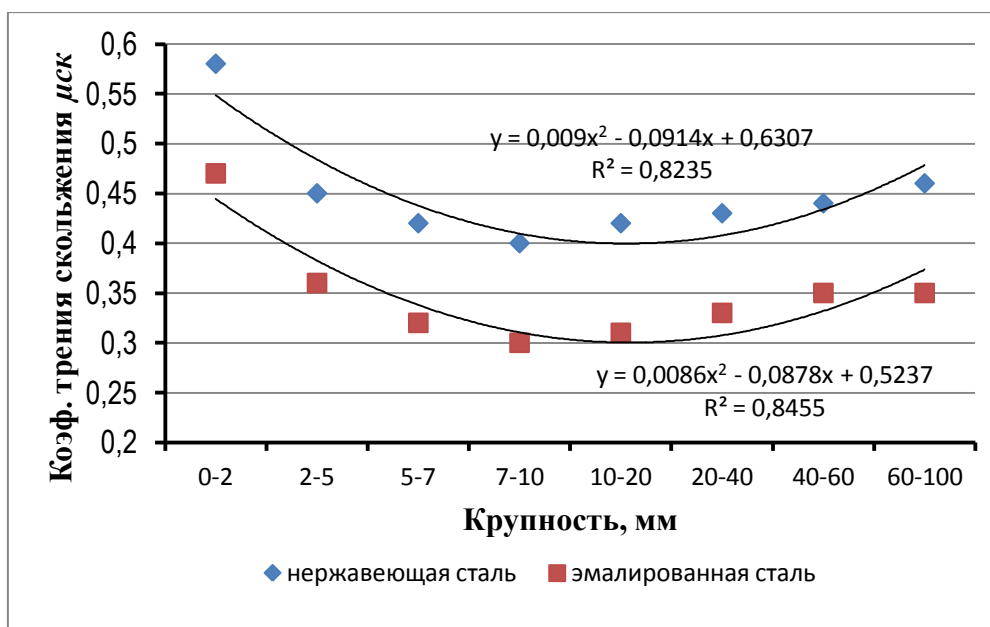


Рисунок 5 – График зависимости коэффициента трения скольжения от исследуемого класса пород и типа поверхности скольжения

Исходя из аналитической аппроксимации установлено, что зависимость коэффициента трения скольжения от крупности породы описывается квадратичным уравнением вида

$$y = ax^2 + bx + c \quad (8)$$

При этом коэффициент достоверности аппроксимации для нержавеющей стали составляет $R^2 = 0,82$, эмалированной стали $R^2 = 0,84$, что свидетельствует о соответствии трендовой модели экспериментальным данным.

Из графика зависимости видно, что с уменьшением крупности породы, значения коэффициента трения увеличиваются, при этом его значения для эмалированной стали на 8-12% меньше чем для нержавеющей стали.

Выводы.

1. На основании лабораторных исследований установлены минимальные углы самотечного движения и коэффициенты трения скольжения отобранных шахтных пород в зависимости от крупности, влажности и типа поверхности скольжения.

2. Зависимость коэффициента трения скольжения от крупности породы описывается квадратичным уравнением вида: $y = ax^2 + bx + c$, при этом достоверность полученных результатов составляет $R^2 = 0,82$ - для нержавеющей и $R^2 = 0,84$ для эмалированной стали.

3. Наличие влаги в породе значительно изменяет значение минимальных углов ее самотечного движения, так с ростом влажности до 13-14% наблюдается увеличение их значений до $47^{\circ}00' \pm 30'$. Дальнейшее увлажнение образцов приводит к снижению соответствующих углов.

4. Использование эмалированной поверхности снижает сопротивление движению материала, благодаря чему угол самотечной установки может быть снижен на $6-10^{\circ}$, в сравнении с нержавеющей сталью.

5. Возможная область применения самотечного способа оставления пустых пород может быть расширена на пласты с углами падения до 18° , при использовании в качестве средства доставки закладочного материала эмалированных листов или рештаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волошин, А.И. Теория и практика создания вибрационно-пневматических машин / А.И. Волошин // Уголь Украины. – 2013. – №2. – С. 8-12.
2. Koshka, O. Surface subsidence during mining thin seams with waste rock storage / O. Koshka, A. Yavors`kyu, D. Malashkevych // Progressive technologies of coal, coalbed methane, and ore mining, CRC Press Taylor&Francis Group, London, UK, 2014. pp. 229-234.
3. Ляпцев, С. А. Закономерности разделения минералов на наклонной плоскости фрикционного сепаратора/ С. А.Ляпцев, В.Я. Потапов, В.В. Потапов [и др.] // Известия Уральского государственного горного университета. – 2014. – №2 (34) – С. 36-40.
4. ГОСТ 12071-2000 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и их хранение». - М.: Межгосударственный стандарт, 2001.
5. ГОСТ 28268-89 «Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности». - М.: Межгосударственный стандарт, 2000.
6. Грачев, Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю. П. Грачев, Ю.М. Плаксин. Москва: ДеЛипринт, 2005. – 296 с.

REFERENCES

1. Voloshin, A. (2013), "Theory and practice of vibration-pneumatic machines", *Coal of Ukraine*, vol. 2, pp. 8-12.
2. Koshka O., Yavors`kyu A., and Malashkevych D. (2014), "Surface subsidence during mining thin seams with waste rock storage", *Progressive technologies of coal, coalbed methane, and ore mining*, CRC Press Taylor&Francis Group, London, pp. 229-234.
3. Lyaptsev, S.A., Potapov, V.J., Potapov, V.V., and Semericov L.A. (2014), "Patterns of mineral separation on an inclined plane friction separator", *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, no. 2(34), pp. 36-40.
4. *GOST 12071-2000: Grunty. Otkor, upakovka, transportirovanie i ikh khranenie* [GOST 12071-2000: Soils. Selection, packaging, transportation and storage], Interstate standard, Moscow, Russia.

5. GOST 28268-89 3 : *Pochvy. Metody opredeleniya vlazhnosti, maksimalnoy gigroskopicheskoy vlazhnosti* [GOST 28268-89 3: “Soils. Methods for determination of moisture content, the maximum hygroscopic moisture”], Interstate standard, Moscow, Russia.

6. Grachev, Yu. P. and Plaksin, Yu. M. (2005), *Matematicheskie metody planirovaniya experimentov* [Mathematical methods for design of experiments], DeLiprint, Moscow, Russia.

Об авторах

Кошка Александр Григорьевич кандидат технических наук, доцент кафедры подземной разработки месторождений Государственного высшего учебного заведения «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, agkoshka@bk.ru.

Малашкевич Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры подземной разработки месторождений Государственного высшего учебного заведения «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, malashkevich_dima@mail.ru.

Щелканов Роман Русланович, студент горного факультета Государственного высшего учебного заведения «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, romacr9@gmail.com.

About the authors

Koshka Aleksandr Grygorevych, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor of the Underground mining department, State Higher Education Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, agkoshka@bk.ru.

Malashkevych Dmitry Sergeevych, Doctoral Student of the Underground mining department, State Higher Education Institution «National Mining University» (SHEI “NMU”), Dnepropetrovsk, Ukraine, malashkevich_dima@mail.ru.

Schelkanov Roman Ruslanovich, Student of Mining faculty. State Higher Education Institution «National Mining University» (SHEI “NMU”), Dnepropetrovsk, Ukraine, romacr9@gmail.com.

Анотація. У статті наведено результати лабораторних досліджень кутів самопливного руху і коефіцієнтів тертя ковзання шахтних порід по двох різних поверхнях, в якості яких використовувалася нержавіюча та емальована сталь. Представлені дані основних фізико-механічних властивостей порід відібраних при проведенні одного з штреків «СДВ «Шахта «Білозерська». На основі методу планування експерименту встановлена необхідна кількість дослідів для отримання достовірних результатів. Наводиться опис лабораторної установки для вивчення закономірностей руху різних закладних матеріалів під дією власної ваги. Отримано залежності мінімальних кутів самопливного руху і коефіцієнтів тертя ковзання від гранулометричного складу і вологості порід, а також типу використовуваної поверхні ковзання.

Ключові слова: залишення порід, коефіцієнт тертя ковзання, планування експерименту, поверхня ковзання.

Abstract. Results of laboratory investigations of gravity motion angels and sliding friction coefficients on two different surfaces - noncorrosive steel and porcelain-enameled steel - are given. Data of basic physical and mechanical properties of the rocks sampled during developing one of the drifts in the “Belozerskaya Mine” are shown. With the help of method of experiments planning a concrete number of experiments required for obtaining true results was determined. Laboratory facilities are described which were used for studying basic laws of different backfill materials moving under the action of own weight.

Dependences between minimal angels of gravity motion, sliding friction coefficients, grain composition and moisture content, as well as type of friction surface used are also given.

Keywords: reservation of the rocks, sliding friction coefficient, experiment planning, sliding surface.

Статья поступила в редакцию 14.10.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук М.С. Четвериком