

УДК 622.74.913.1

В.П. Надутый, д-р техн. наук, профессор,
В.Ф. Ягнюков, канд. техн. наук, мл. науч. сотр.,
И.В. Ягнюкова, магистр
(ИГТМ НАН Украины)

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
КУСКОВОЙ ГОРНОЙ МАССЫ С ВАЛКАМИ
ВИБРАЦИОННОГО КЛАССИФИКАТОРА**

В.П. Надутый, д-р техн. наук, професор,
В.Ф. Ягнюков, канд. техн. наук, мол. наук. співр.,
І.В. Ягнюкова, магістр
(ІГТМ НАН України)

**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЗАЄМОДІЇ
КУСКОВОЇ ГІРСЬКОЇ МАСИ З ВАЛКАМИ
ВІБРАЦІЙНОГО КЛАСИФІКАТОРА**

V.P. Naduty, D.Sc. (Tech.), Professor,
V.F. Yagniukov, Ph.D. (Tech.), Junior Researcher,
I.V. Yagniukova, M.Sc. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

**THE RESULTS OF INVESTIGATIONS
OF LUMPY MINED ROCK AND THE ROLLERS
OF VIBRATING SCREEN INTERACTION**

Аннотация. Приведены результаты исследования взаимодействия кусковой горной массы с валком вибрационного классификатора. Выполнен анализ такого взаимодействия и получены аналитические выражения для вычисления ударного импульса и силы удара, которые позволяют определять напряженное состояние вала при соударении. Предшествующими испытаниями валкового классификатора в промышленных условиях при разделении крупнокусковой горной массы установлено, что наиболее нагруженными являются валки в пунктах приемки горной массы. Исходя из массы падающих кусков и их энергии удара, возникла необходимость решения задачи их взаимодействия. Сравнительный анализ силы ударного взаимодействия куска горной массы с валком в процессе транспортирования не рассматривался, поскольку она (сила) на порядок меньше силы при падении куска. Рассмотрен наиболее опасный случай центрального удара горной массы посередине длины вала.

Ключевые слова: валковый классификатор, ударные нагрузки, кусковая горная масса, валок, ударный импульс, сила удара.

Совершенствование процесса классификации горной массы идет по пути снижения энергоемкости, повышения эффективности разделения и удельной производительности. Актуальность совершенствования возрастает при разделении по крупности влажной горной массы и при снижении крупности разделения. Несмотря на массовость использования операции вибрационного грохочения и значительное количество выпускаемых виброгрохотов и их модификаций при постоянном совершенствовании, возникает целый ряд задач.

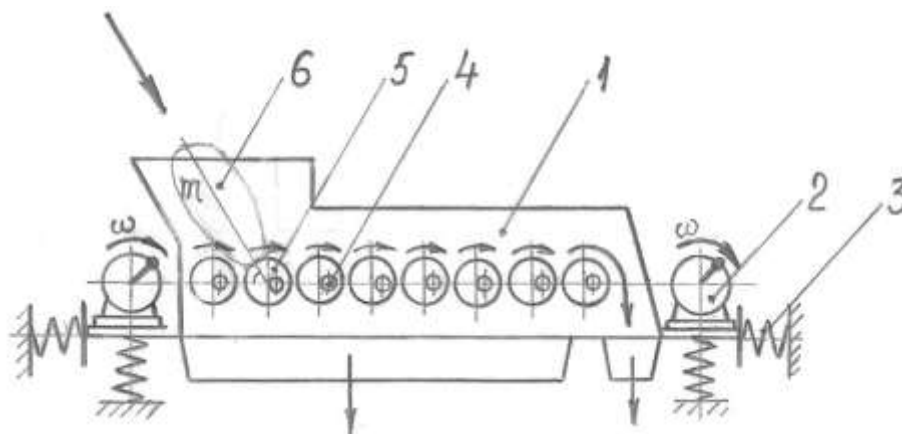
В последние годы в зарубежной практике получили распространение валковые классификаторы для разделения сыпучей массы различной крупности. Они хорошо себя зарекомендовали в промышленных условиях, однако в литературе практически отсутствуют методы расчета их параметров. Кроме того, известные конструкции не являются вибрационными и имеют сложную кинематику приводов для вращения валков.

Поскольку вибрационный принцип взаимодействия рабочего органа классификатора с перерабатываемой горной массой позволяет снижать энергопотребление машины, то в Институте геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины разработаны, на уровне изобретений, валковые вибрационные классификаторы [1, 2], исследованы зависимости технологических показателей грохочения (эффективности и производительности) от режимных и конструктивных параметров этих машин на лабораторных и опытных образцах [3, 4], проверена эффективность их использования в промышленных условиях [5] при классификации горной массы мелких классов крупности.

Использование валковых вибрационных классификаторов после крупного и среднего дробления, а также в пунктах перегрузки горной массы с одновременным извлечением мелких классов крупности указало на актуальность исследования взаимодействия валков с падающими крупными кусками. В этом случае кинетическая энергия удара по валку может превышать допустимые пределы, что отрицательно сказывается на долговечности работы машины.

Целью исследований в данной работе является анализ взаимодействия при соударении кусковой горной массы с валком вибрационного классификатора и определение параметров такого силового воздействия.

На рис. 1 показана схема валкового вибрационного классификатора в процессе взаимодействия валка с падающим куском массой m и начальной скоростью движения v .



- 1 – корпус; 2 – инерционный вибровозбудитель; 3 – упругие связи;
4 – эксцентрично смещенная ось валка; 5 – валок;
6 – кусок горной массы в момент соударения с валком классификатора

Рисунок 1 – Схема валкового вибрационного грохота

На рис. 2 представлена расчетная схема взаимодействия куска горной массы с валком. Рассматривается центральный боковой удар в средней точке по длине валка.

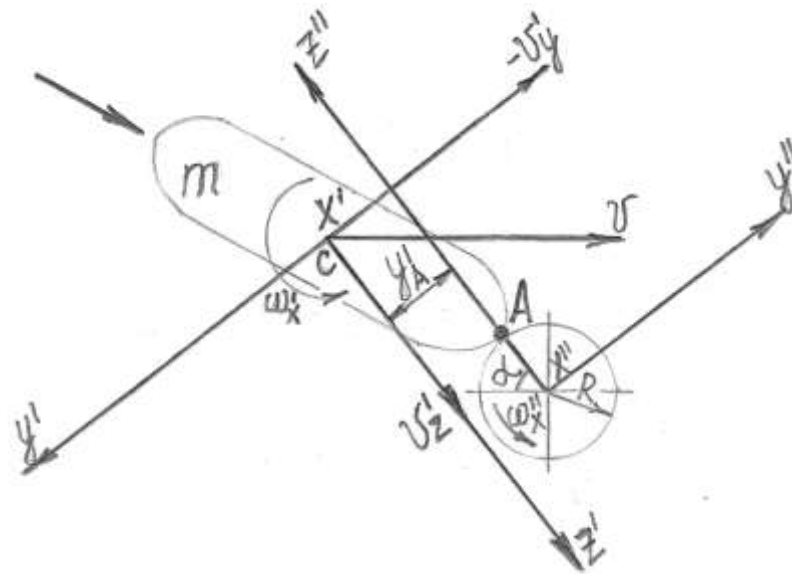


Рисунок 2 – Расчетная схема взаимодействия куска горной массы с валком

Принимаем, что ось x'' проходит по оси валка. Ось z'' проходит через точку A соприкосновения куска с валком. За начало координатной системы для куска принята точка C – центр тяжести куска.

Ввиду параллельности осей x'' и x' получаем:

$$x_A' - x_A'' = 0. \quad (1)$$

Положение куска материала по отношению к валку определяется углом α , образованным горизонталью и осью z'' . Будем предполагать далее, что величина самого угла α уже известна, в силу того, что мы знаем угол наклона устройства подачи минерального сырья к плоскости рабочей поверхности валкового грохота.

В момент соударения на кусок и валок действует ударный импульс S . Согласно основным уравнениям теории удара, для куска материала получаем:

$$\begin{aligned} m(v_{x_2}' - v_{x_1}') &= 0, \\ m(v_{z_2}' - v_{z_1}') &= -S, \\ m(v_{y_2}' - v_{y_1}') &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где m – масса куска материала; $v_{x_1}', v_{y_1}', v_{z_1}'$ – составляющие скорости куска материала до удара; $v_{x_2}', v_{y_2}', v_{z_2}'$ – составляющие скорости куска материала после удара.

Теорема об изменении кинетического момента при ударе гласит, что изменение кинетического момента механической системы относительно любого неподвижного центра за время удара равно сумме моментов всех внешних ударных импульсов, приложенных к точкам системы, относительно этого же центра. Из этих соображений справедливо следующее выражение:

$$I_K'(\omega_{x_2}' - \omega_{x_1}') = -y_A' \cdot S, \quad (3)$$

где $\omega_{x_1}', \omega_{x_2}'$ – угловые скорости куска до и после удара; I_K' – момент инерции куска относительно оси x' ; y_A' – проекция расстояния \overline{CA} на ось y' .

Импульс S действует по осям z' и z'' прямолинейно со скоростью v . Импульс S действует по осям y' и y'' с угловыми скоростями ω_{x_1}' и ω_{x_2}' .

Для упрощения предполагается, что точка удара лежит в одной плоскости с центром тяжести C , тогда остальные компоненты кинетических моментов равны нулю, так как ни в какой другой плоскости больше не возможно отобразить плечо силы удара.

Согласно уравнениям (2) имеем:

$$\begin{aligned} v_{x_1}' &= v_{x_2}', \\ v_{y_1}' &= v_{y_2}', \\ v_{z_2}' &= -\frac{S}{m} + v_{z_1}' = v_{z_1}' - \frac{S}{m}. \end{aligned} \quad (4)$$

Используя тригонометрические свойства, одновременно можем выразить проекции скорости куска до удара на оси y' и z' (рис. 3)

$$\begin{aligned} v_{y_1}' &= -v \cdot \sin \alpha, \\ v_{z_1}' &= v \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

Теперь из (4) и (5) следует:

$$\begin{aligned} v_{y_2}' &= -v \cdot \sin \alpha, \\ v_{z_2}' &= v \cdot \cos \alpha - \frac{S}{m}. \end{aligned} \quad (6)$$

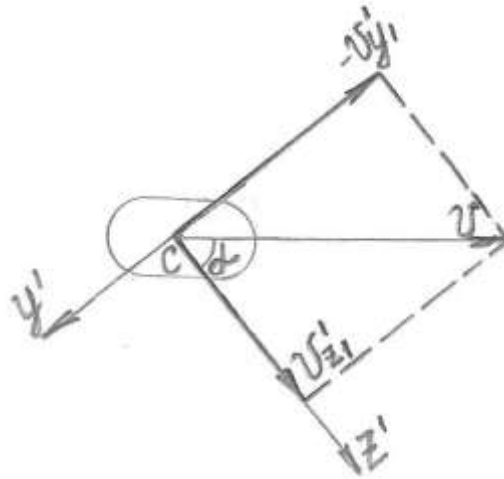


Рисунок 3 – Проекции скорости куска до удара

Из уравнения (3) при условии, что $\omega_{x_1}' = 0$, то есть кусок не содержит в себе вращательного движения до удара, получим:

$$\omega_{x_2}' = -\frac{y_A' S}{I_K'}. \quad (7)$$

Теперь следует рассмотреть вращение валка (рис. 4).

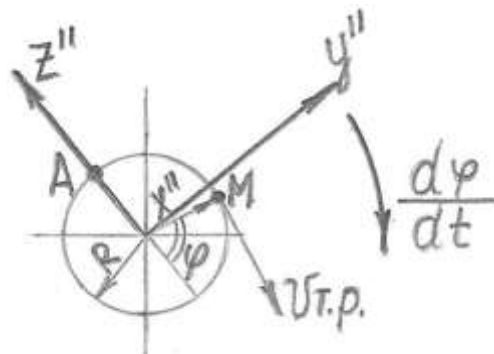


Рисунок 4 – Разложение сил при вращении валка

Линейная скорость любой точки поверхности валка равна произведению изменения пройденного угла по окружности валка и расстояния от этой точки до оси вращения x'' , что и является радиусом валка R

$$v_{m.p.} = \frac{d\varphi}{dt} \cdot R = \omega_x'' \cdot R, \quad (8)$$

где φ – угол, пройденный точкой на поверхности валка; R – внешний радиус валка.

Предположим, что валки закреплены таким образом, что их вращение вокруг своих осей не изменяется вследствие удара куском материала. Значит, угловые скорости вращающегося валка относительно оси x'' до и после удара равны

$$\omega_{x_2}'' = \omega_{x_1}'' = \frac{v}{R}. \quad (9)$$

Для определения величины ударного импульса воспользуемся третьим уравнением теории удара (гипотеза Ньютона):

$$\frac{u_{A_2}}{u_{A_1}} = k, \quad (10)$$

где u_{A_1} – абсолютная нормальная скорость в точке A соприкосновения до удара; u_{A_2} – абсолютная нормальная скорость в точке A соприкосновения после удара; k – коэффициент восстановления.

Для определения абсолютных нормальных скоростей в точке соприкосновения куска материала с валком до и после удара необходимо составить сумму составляющих этих скоростей, учитывая скорость куска материала в проекции на ось z' , а также линейные скорости крайних точек куска и валка при вращении обоих вокруг своих осей x' и x'' , соответственно,

$$\begin{aligned} u_{A_2} &= v_{z_2}' + \omega_{x_2}' \cdot y_A' + \omega_{x_2}'' \cdot y_A'', \\ u_{A_1} &= v_{z_1}' + \omega_{x_1}' \cdot y_A' + \omega_{x_1}'' \cdot y_A''. \end{aligned} \quad (11)$$

Изменение кинетического момента для вращающегося валка выглядело бы следующим образом:

$$I_K'' (\omega_{x_2}'' - \omega_{x_1}'') = y_A'' \cdot S, \quad (12)$$

но в силу (9)

$$\omega_{x_2}'' - \omega_{x_1}'' = 0. \quad (13)$$

Поэтому

$$y_A'' = 0, \quad (14)$$

а значит формулы (11) приводятся к следующему виду:

$$\begin{aligned} u_{A_2} &= v_{z_2}' + \omega_{x_2}' \cdot y_A', \\ u_{A_1} &= v_{z_1}' + \omega_{x_1}' \cdot y_A'. \end{aligned} \quad (15)$$

Теперь из (10)

$$u_{A_2} = k \cdot u_{A_1}. \quad (16)$$

Произведем преобразования, подставив (15) в (16):

$$v_{z_2}' + \omega_{x_2}' \cdot y_A' = k(v_{z_1}' + \omega_{x_1}' \cdot y_A'). \quad (17)$$

Ввиду того, что кусок материала не имеет начальной вращательной составляющей до ударного соприкосновения с валком, то есть $\omega_{x_1}' = 0$, перепишем (17)

$$v_{z_2}' + \omega_{x_2}' \cdot y_A' = k \cdot v_{z_1}'. \quad (18)$$

Учитывая (5)-(7), произведем некоторые преобразования

$$v \cdot \cos \alpha - \frac{S}{m} - \frac{y_A'^2 \cdot S}{I_K'} = k v \cdot \cos \alpha,$$

$$S \cdot \left(\frac{1}{m} + \frac{y_A'^2}{I_K'} \right) = v \cdot \cos \alpha (1 - k),$$

$$S = \frac{v \cdot \cos \alpha (1 - k)}{\frac{I_K' + m y_A'^2}{m \cdot I_K'}}.$$

Таким образом, конечное выражение импульса удара записывается в следующем виде:

$$S = \frac{mv \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1-k}{2}}{1 + \frac{m y_A'^2}{I_k'}} \quad (19)$$

При ударе куска материала о валок справедливо соотношение:

$$Pf_a = m v_{z_1}'^2 - v_{z_2}'^2, \quad (20)$$

где P – нагрузка на обечайку валка; f_a – прогиб валка в местах приложения сил.

$$f_a = \frac{P}{6EI} l^2 - d^2 d, \quad (21)$$

где l – длина валка; d – расстояние от опоры валка до точки приложения силы; EI – жесткость валка.

$$EI = 0,1 \cdot d_o^4 \cdot E, \quad (22)$$

где d_o – диаметр оси валка; E – модуль упругости стали.

Из уравнения (20), учитывая (5), (6) и (21), получим силу удара, действующую на валок

$$P = \sqrt{\frac{6EI}{l(l^2 - d^2)}} \cdot \sqrt{\frac{S}{m} 2mv \cos \alpha - S}. \quad (23)$$

Полученные формулы (19) и (23) позволяют произвести расчет усилий, действующих на валок при соударении с куском материала. Или же в общем виде сила удара:

$$P = \frac{m \cdot v \cdot I_k' \cdot \cos \alpha}{I_k' + m y_A'^2} \cdot \left(\frac{6EI}{l(l^2 - d^2)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left[1 - k \left(\frac{1}{m} + \frac{y_A'^2}{I_k'} + \frac{k-1}{2m} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (24)$$

Выводы:

Таким образом, в результате выполненного анализа взаимодействия при соударении кусковой горной массы с валком вибрационного классификатора получены аналитические выражения для вычисления ударного импульса и силы удара, которые позволяют определить при дальнейших исследованиях уровень напряженного состояния валка, сравнить его с предельно-допустимыми нагруз-

ками и принять конструкторское решение по обеспечению работоспособности валков в реальных экстремальных условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. на полезную модель № 47329 UA, МКИ 07В 1/00 (2010.01). Валковый классификатор / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков; заявитель и патентообладатель ИГТМ НАН Украины. – и 2009 08424; заявл. 10.08.2009; опубл. 25.01.2010, Бюл. № 2. – 4 с. : ил.
2. Деклараци́нный патент на винахід № 71721A UA, МКИ 7В 07В 1/14 (2004.12). Валковий класифікатор / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков; заявник і патентовласник ІГТМ НАН України. – № 2003098828; заявл. 29.09.2003; опубл. 15.12.2004, Бюл. № 12. – 3 с. : ил.
3. Надутый, В.П. Определение влияния конструктивных параметров вибрационного валкового классификатора на технологические показатели / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков, Л.Н. Прокопишин // Вісник Національного технічного університету. – Харків: НТУ "ХПІ", 2003. – С. 75-78.
4. Надутый, В.П. Обобщенная модель работы валкового вибрационного классификатора с учетом режимных и конструктивных параметров / В.П. Надутый, А.М. Эрперт, В.Ф. Ягнюков // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 48. – С. 286-290.
5. Надутый, В.П. Результаты промышленной апробации валкового вибрационного грохота / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков // Вібрації в техніці та технологія: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця. – 2003. – Вип. 5(31). – С. 55-58.
6. Маркеев, А.П. Теоретическая механика: учебное пособие для механико-математических специальностей университетов / А.П. Маркеев. – М.: Наука, 1990. –240 с.
7. Надутый, В.П. Синтез параметров валковых классификаторов вибрационного типа : Монография / В.П. Надутый, В.А. Остапенко, В.Ф. Ягнюков. – К. : Наук. думка, 2006. – 188 с.

REFERENCES

1. Naduty, V.P. and Yagnjukov, V.F., M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (2010), *Valkovy klassifikator* [Rolling classifier], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 47329.
2. Naduty, V.P. and Yagnjukov, V.F., M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (2004), *Valkovy klassifikator* [Rolling classifier], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Declarative pat. № 71721A.
3. Naduty, V.P., Yagnjukov, V.F. and Prokopishin, L.N. (2003), "Definition of influence of design data vibrating rolling classifier on technological parameters", *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivsky politekhnichny instytut"*, pp. 75-78.
4. Naduty, V.P., Erpert, A.V. and Yagnjukov, V.F. (2004), "The Generalized model of work of rolling vibrating classifier taking into account regime and design parameters", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geotechnical Mechanics], no. 48, pp. 286-290.
5. Naduty, V.P. and Yagnjukov, V.F. (2003), "Results of industrial approbation of rolling vibrating screen", *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnologiyakh*, no. 5, pp. 55-58.
6. Markeyev, A.P. (1990), *Teoreticheskaya mekhanika* [The theoretical mechanics], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
7. Naduty, V.P., Ostapenko, V.A. and Yagnjukov, V.F. (2006), *Sintez parametrov valkovykh klassifikatorov vibratsionnogo tipa* [Synthesis of parameters rolling classifiers of a vibrating type], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

Об авторах

Надуть Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики

им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), г. Днепропетровск, Украина, nadutyvp@yandex.ua.

Ягнюков Владимир Федорович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), г. Днепропетровск, Украина, astasdnepr@rambler.ru.

Ягнюкова Ирина Владимировна, инженер отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), г. Днепропетровск, Украина, yagnyukova@gmail.com.

About the authors

Naduty Vladimir Petrovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, nadutyvp@yandex.ua.

Yagniukov Vladimir Fedorovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Junior Researcher in Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, astasdnepr@rambler.ru.

Yagnyukova Irina Vladimirovna, Engineer in Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, yagnyukova@gmail.com.

Анотація. Приведено результати дослідження взаємодії кускової гірської маси з валком вібраційного класифікатора. Виконано аналіз такої взаємодії й отримано аналітичні вирази для обчислення ударного імпульсу і сили удару, що дозволяють визначити напружений стан валка при зіткненні. Попередніми іспитами валкового класифікатора в промислових умовах при розділенні крупно-кускової гірської маси встановлено, що найбільш навантаженими є валки в пунктах приймання гірської маси. Виходячи з маси падаючих шматків і їхньої енергії удару, виникла необхідність вирішення задачі їхньої взаємодії. Порівняльний аналіз сили ударної взаємодії шматка гірської маси з валком у процесі транспортування не розглядався, оскільки вона (сила) на порядок менша за силу при падінні шматка. Розглянуто найбільш небезпечний випадок центрального удару гірської маси посередині довжини валка.

Ключові слова: валковий класифікатор, ударні навантаження, кускова гірська маса, валок, ударний імпульс, сила удару.

Abstract. There are the results of investigations of lumpy mined rock and the roller of vibrating classifier interaction given. The analysis of this interaction and the analytical expressions for the calculation of the impact pulse and the impact force is implemented, which allow us to determine the roller's tension state under an impact. Previous tests of the roller classifier in industrial conditions for the separation of large-sized lumpy rock mass demonstrated that the most loaded rollers are located at the place of the rock mass receiving. Based on the weight of the falling pieces and their impact energy it became necessary to solve the problem of their interaction. Comparative analysis of the impact interaction force, directed from a lump of the rock mass to the roller during the process of transportation, was not observed because the following (force) is an order of magnitude less than the force under falling lump. There was considered the most dangerous case of central impact of the rock mass into the middle of the length of the roller

Key words: roller classifier, impact, lumpy rock mass, roller, impact pulse, the force of impact.

Статья поступила в редакцию 25.02. 2013

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Шевченко

УДК 551.243

Курмелев И.И., канд. геол. наук, доцент
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

**ТЕКТОНИЧЕСКАЯ НАРУШЕННОСТЬ СНЕЖНЯНСКОЙ
ПЛОЩАДИ И ЕЕ РЕДКОМЕТАЛЬНОЕ ОРУДЕНЕНИЕ**

Курмельов І.І., канд. геол. наук, доцент
(Державний ВНЗ «НГУ»)

**ТЕКТОНІЧНА ПОРУШЕНІСТЬ СНІЖНЯНСЬКОЇ ПЛОЩІ І ЇЇ
РІДКОМЕТАЛЬНЕ ОРУДНЕННЯ**

Kurmelev I.I., Ph. D. (Geol.), Associate Professor
(State HEI «NMU»)

**TECTONIC DISTURBANCES SNEZHNYANSKIY AREA AND ITS RARE
METAL MINERALIZATION**

Аннотация. Изучение аномальных накоплений редких элементов в зонах тектонических нарушений в зависимости от литологического типа вмещающих уголь пород. Главная задача исследований заключается в выявлении геохимических аномалий и в оценке их экологической значимости. В расчетах использовалось понятие «геохимический фон», как «среднее значение» для диапазона значений, которые считаются нормальными и как показатель концентрации, указывающей, во сколько раз содержание элемента в данной точке выше уровня фона. Выполнен анализ аномальных содержаний редких элементов в литологических типах вмещающих пород с привязкой к тектоническим нарушениям и угольным пластам, горные выработки по которым вскрыли нарушения с большими амплитудами смещения, развитым в Снежнянской площади. Впервые для тектонических нарушений Снежнянской площади выявлены аномальные содержания редких элементов в литологических типах вмещающих пород. Проведенные исследования позволят расширить представление о накоплении редких элементов в зоне тектонических нарушений, являющихся «геохимическими барьерами» при распределении аномальных содержаний элементов.

Ключевые слова: тектонические нарушения, редкие элементы, геохимический фон, аномальные содержания элементов

Длительные исследования при разведке и эксплуатации угольных месторождений Донбасса позволили с достаточной степенью детальности охарактеризовать региональные закономерности геологического развития в широком аспекте преобразований осадочных пород.

Одной из наиболее важных научно-прикладных задач в угольной геологии остается прогнозирование тектонической нарушенности, которая часто сопровождается снижением устойчивости пород почвы и кровли, другими явлениями, влияющими на применение высокопроизводительной угледобывающей техники.