

С.П. Шевчук, д-р техн. наук, проф.,  
С.В. Зайченко, д-р техн. наук, доц., проф.,  
В.В. Вапнична, канд. техн. наук, доц.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”

## ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ МЕХАТРОННІ МЕТОДИ ЗБАГАЧЕННЯ ВУГІЛЛЯ З СИЛОВИМ ВИДАЛЕННЯМ СКЛАДОВИХ КОМПОНЕНТІВ

*У статті представлено нові енергоресурсозберігаючі способи сухого збагачення за тертям з силовим видаленням породи, що в порівнянні з традиційними способами не потребують значних витрат води і електричної енергії. З метою встановлення енергосилових параметрів побудована мехатронна модель процесів збагачення за тертям, реалізація яких проведено чисельними і аналітичними методами.*

*Отримані залежності розподілів тисків дозволяють встановити опори обертанню робочих органів при проведенні процесу збагачення.*

*Встановлено, що з підвищенням міцності породи контактні тиски зростають лінійно по дузі взаємодії для випадку дискової збагачувальної машини і за параболічною залежністю для валкової, що призведе до збільшення енергоємності процесу збагачення.*

*Розроблені способи сухого збагачення за тертям з силовим видаленням породи пройшли експериментальну перевірку на лабораторних стендах і промислове впровадження.*

**Ключові слова:** збагачення, тертя, порода, вугілля, енергоресурсозбереження.

**Вступ.** У структурі енергетичного балансу України частка імпорту енергоресурсів перевищує власний їх видобуток та виробництво, що ставить країну в серйозну залежність від імпорту, попри те, що Україна має всі можливості повністю забезпечити себе енергією. Оскільки на підвищення обсягів вироблення енергії з альтернативних джерел потрібно ще багато років, основним енергоносієм на близьку перспективу залишається вугілля. В останні роки розробка корисних копалин супроводжується зниженням якості видобутої первинної сировини, особливо при видобутку вугілля за рахунок збільшення зольності і ступеня подрібнення маси. Методи вологого збагачення вугілля, які знайшли широке застосування в Україні, потребують залучення в технологічний процес значного об'єму води і енергії з утворенням великої кількості відходів. Саме тому, проблема створення і реалізація ресурсоефективних методів збагачення дрібних і середніх класів вугілля в умовах геотехнічних підприємств особливо актуальна. Створення компактного і енергоємного обладнання машин для збагачення вугілля, яке можливо використати у умовах геотехнічних підприємств, дозволить значно зменшити транспортні витрати при доставці на збагачувальні фабрики.

Серед методів сухого збагачення маси, яка складається з компонентів, що мають різні коефіцієнти тертя, слід відзначити метод сухого збагачення за тертям [1, 2]. Запропоновані відомі схеми методом збагачення за тертям з ряду причин не знайшли широкого застосування. Головним недоліком існуючих схем збагачення за тертям слід вважати складність процесу взаємодії компонентів маси під час їх руху, і як наслідок, майже однакова траєкторія руху і мала швидкість часток компонентів. Також до недоліків відносять складність виготовлення робочих органів збагачувальних машин.

**Мета та завдання.** Для створення нової ресурсозберігаючої технології збагачення вугілля необхідно використати процеси сегрегації, в основу яких покладено використання триботехнічних властивостей матеріалів, що розділяються з наданням високої швидкості робочих органів для забезпечення необхідної продуктивності.

**Матеріал і результати досліджень.** Для усунення існуючих недоліків авторами запропонована нова схема сухого збагачення за тертям [3], яка передбачає силове відділення часток одного компоненту від іншого. Принцип роботи машини збагачення за тертям представлено на рисунку 1. При взаємодії частки діаметром  $d$  з валками діаметром  $D$  можливо два варіанти подальшого руху частки: перший – сил тертя  $\mu P$  буде недостатньо для подолання реакції нормальної складової дії валків на частку  $P$ , і вона буде ковзати по валках; другий – сили тертя захватять частку і відбудеться її подрібнення. Характер взаємодії валків з часткою визначають геометричні і фізичні параметри частки і валків. Спроектвавши на вісь  $OY$  сили, які діють на частку можливо знайти залежність між кутом захвату  $\alpha$  і коефіцієнтом тертя  $\mu$  для умов переходу ковзання в захват:

$$2P \cdot \sin(\alpha / 2) - 2\mu P \cos(\alpha / 2) = 0, \quad \operatorname{tg}(\alpha / 2) = \mu \quad (1)$$

Для визначення коефіцієнту тертя іноді використовують тангенс кута між тангенціальною і нормальною складовою  $tg\varphi$ . Підставивши значення для коефіцієнту тертя  $\mu$ , отримаємо значення для кута захвату:

$$tg(\alpha / 2) = tg\varphi, \alpha = 2\varphi. \quad (2)$$

З виразу (2) можливо зробити висновок, що при одних і тих самих геометричних параметрах взаємодії валків з масою частина матеріалу з більшим значенням кута тертя буде захоплюватись, а частина залишиться у зоні контакту. Даний ефект можливо застосувати при відділенні породи від вугілля, яке має коефіцієнт тертя у 2-3 рази менший ніж порода.

Також, розглянувши схему взаємодії частки маси з валком (рис. 1), можливо знайти зв'язок геометричних параметрів системи:

$$D = \frac{d \cdot \left( \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{s}{d} \right)}{1 - \cos \frac{\alpha}{2}}. \quad (3)$$

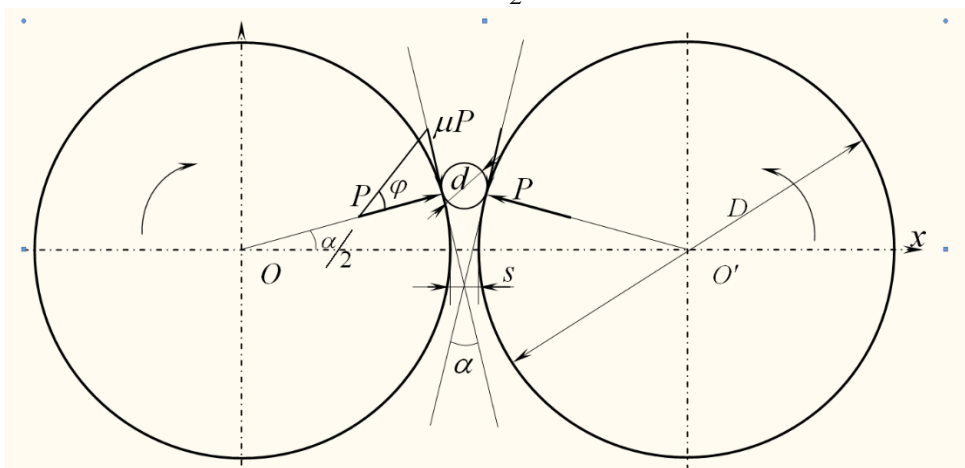


Рисунок 1 – Схема взаємодії частки з валками.

Зробивши аналіз виразу (3), можна прийти до висновку, що для різного діаметру частки  $d$  маси необхідно застосовувати валок різного діаметру  $D$ . Але таке рішення призводить до використання валків змінного радіусу (конічної форми), що призводить до високої металоємкості і складності конструкції збагачувальної машини, високих енерговитрат на подрібнення матеріалу.

З метою усунення даних недоліків авторами були проведені експериментальні дослідження збагачення за кутом тертя з силовим видаленням породи (рис. 2). Експериментальна установка містить в собі валки постійного діаметру, з можливістю зміни міжосьової відстані і привід.

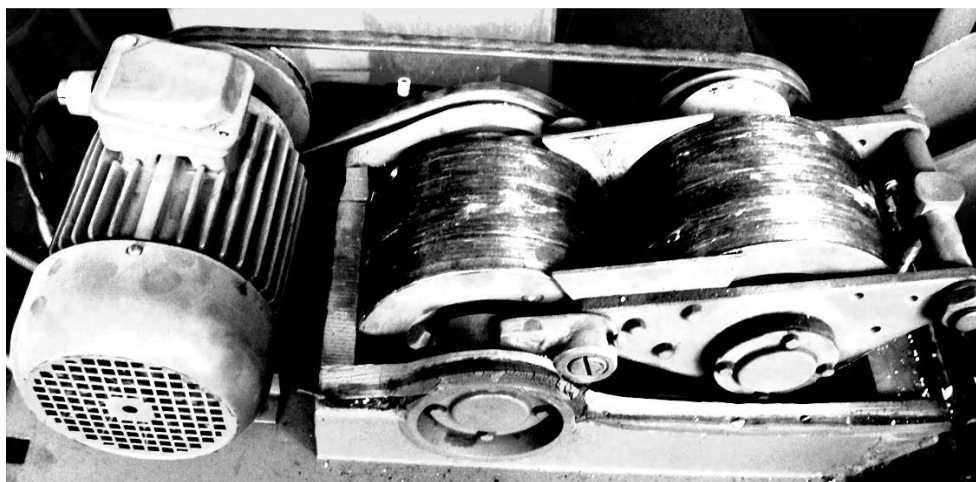


Рисунок 2 – Експериментальна установка сухого збагачення за тертям

Проведені дослідження підтвердили можливість збагачення за кутом тертя з силовим видаленням породи циліндричними валками і створення нової схеми машини (рис. 3). Важливою відмінністю нової

машини є циліндричні валки 1, осі яких розташовані під кутом одна до одної. Це дозволить змінити відстань між валками  $S$  вздовж їх довжини і, як наслідок, дозволяє обробляти масу різних розмірів на одній машині. Зміна відстані між валками також зменшує ступінь подрібнення, що призводить до зменшення енерговитрат машини.

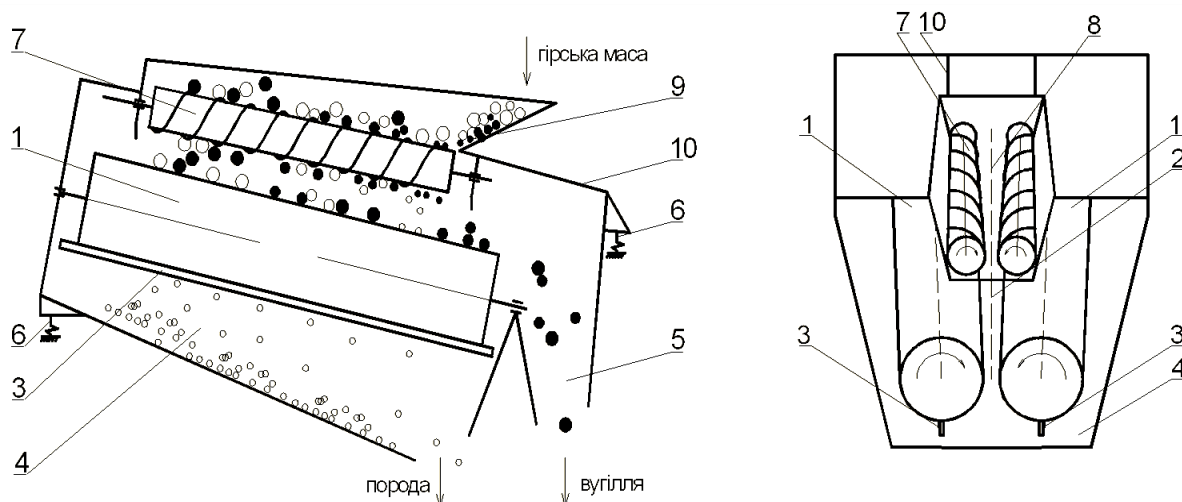


Рисунок 3 – Продольний перетин збагачувальної установки за тертям:

1 – валки; 2 – камера подрібнення; 3 – очищувачі; 4,5 – спрямовуючі лотки; 6 – амортизатори; 7 – шнековий живильник; 8 – розвантажувальна щiлина; 9 – бункер; 10 – корпус установки.

Для аналізу роботи нової машини первинною задачею є встановлення енергосилових параметрів процесу взаємодії робочих органів з масою. Цьому питанню присвячені роботи П. Ріттингера, В.Л.Кирпичова, Ф. Кіка, П.А. Ребіндера і Ф. Бонда, які встановили енергетичні витрати процесу подрібнення. Для створення нової машини необхідним є також визначення сил реакції середовища на дію робочих органів.

При взаємодії валків з середовищем можливо застосувати принципи вирішення контактних задач взаємодії валків з середовищем, які використані в теорії прокату [4, 5].

Більшість порід мають зернисту структуру, причому міжкристалічне зчеплення значно менше міцності самих зерен. Деякі види вапняків і глини володіють пластичними властивостями. Їх руйнування при складному напруженому стані настає у випадку, коли найбільші дотичні напруження набувають значень, які відповідають межі міцності при зсуві. Тому при визначенні сил реакції середовища на робочі органи машини доцільно використовувати в якості характеристики матеріалу міцність при зсуві  $\tau_s$ .

Для вирішення контактної задачі взаємодії валків з середовищем розглядаються умови рівноваги елементарного шару матеріалу, який знаходиться між валками. Дія верхнього шару матеріалу на виділений елемент має вираз  $\sigma_y h_y$ , де  $\sigma_y$  – середній нормальний тиск (рис. 4). Дію нижнього шару матеріалу можливо представити у вигляді  $(\sigma_y + d\sigma_y)(h_y + dh_y)$ .

Умова рівноваги елементу елементарного шару матеріалу товщиною  $dy$  визначається рівнянням:

$$\sum Y = (\sigma_y + d\sigma_y)(h_y + dh_y) - \sigma_y h_y - 2p_{\varphi, B_x} \operatorname{tg} \varphi dx + 2\tau_{\varphi, B_x} dy. \quad (4)$$

Рівняння (4) є вихідним для знаходження контактного тиску. Для його розв'язання припускають, що в контактній зоні між робочим органом і середовищем діють сили кулонівського тертя.

Результатом розв'язання диференційного рівняння (4) є встановлення розподілу нормального  $p_\varphi$  і дотичного тиску  $\tau_\varphi$  по площі взаємодії валка з середовищем:

$$p(\varphi, B_x) = \frac{2\tau_s \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha}{4} \right)}{\mu} \left[ \left( \frac{\mu}{\operatorname{tg} \left( \frac{\alpha}{4} \right)} - 1 \right) \left( \frac{s_1 + \frac{s_2 - s_1}{B} B_x + D(1 - \cos \frac{\alpha}{2})}{s_1 + \frac{s_2 - s_1}{B} B_x + D(1 - \cos \varphi)} \right)^{\operatorname{tg} \left( \frac{\mu}{4} \right)} + 1 \right]; \quad (5)$$

$$\tau(\varphi, B_x) = \mu p(\varphi, B_x),$$

де  $\tau_s$  - міцність породи при зсуві;  $\mu$  - коефіцієнт тертя породи по металу;  $s_1, s_2$  - відстані між валками;  $B$  - довжина валка;  $B_x$  - координата точки повздож валка;  $\varphi$  - кутова координата на дузі взаємодії валка;  $D$  - діаметр валка;

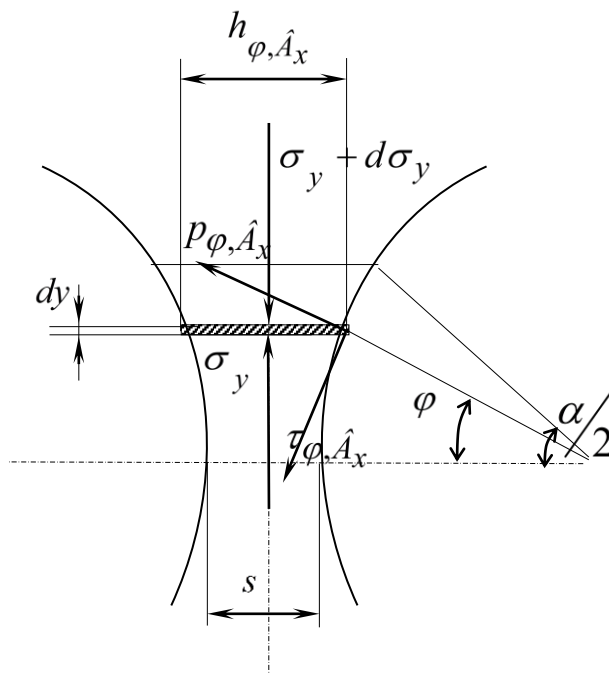


Рисунок 4 – Схема контактної взаємодії валка з середовищем

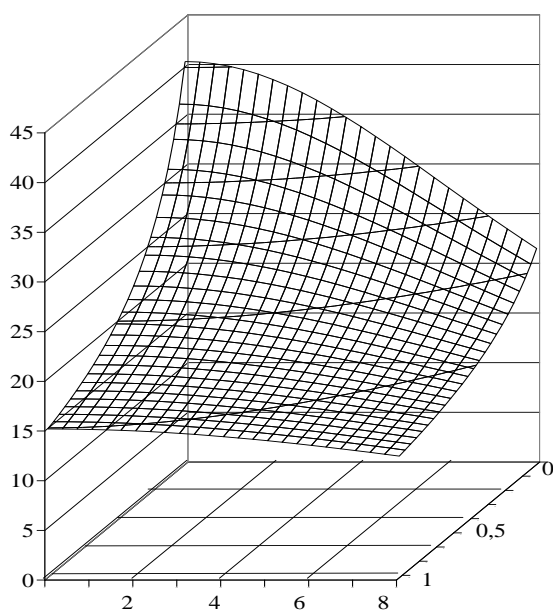


Рисунок 5 – Розподіл нормального контактного тиску по площині контакту

Графічно розподіл нормального тиску (5) по площі взаємодії валка з середовищем для умов збагачення за тертям можливо представити на трьохмірному графіку (рис. 5). Отримані залежності розподілу контактних тисків дозволять створити методіку розрахунку головних конструктивних параметрів мехатронних систем шляхом визначення сил і крутних моментів дії нормальних і дотичних контактних тисків породи на робочі органи збагачувальної машини.

Слід відзначити, що представлена схема при низькій зольності виходу вугілля має малу продуктивність. Для усунення даного недоліку авторами запропонована нова схема сухого збагачення за

тертям, яка передбачає силове відділення частин одного компонента від іншого [6]. Принцип роботи машини збагачення за тертям представлений на рис. 6. Мехатронна система виборчого дроблення працює таким чином. Маса з живильника 2 потрапляє в простір між дисками 1, які обертаються в одну сторону. Під дією сил тертя частки породи захоплюються дисками 1 і, подрібнюючись, потрапляють в приймальний бункер породи 4. Дія сил тертя на шматки вугілля достатня для обертання разом з дисками і недостатня для їх захоплення і подрібнення, в наслідок порівняно меншого значення коефіцієнта тертя вугілля порівняно з коефіцієнтом тертя породи. При цьому диски 1 розганяють і закидають частини вугілля в приймальний бункер вугілля 3.

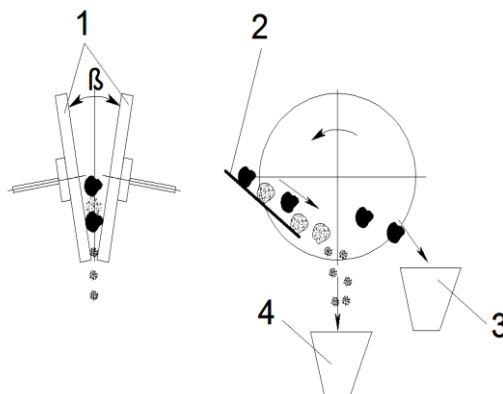


Рисунок 6 – Схема роботи дискової машини вибіркового дроблення

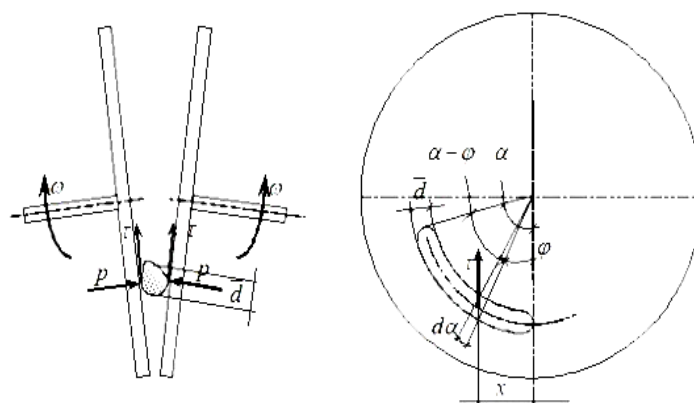


Рисунок 7 – Схема визначення моменту дроблення породи

Розглянемо процес взаємодії маси з дисками збагачувальної машини (рис. 6). У процесі обертання дисків зі швидкістю  $\omega$  відбувається захоплення маси. Початок взаємодії характеризує кут  $\alpha$ . При дробленні маси із середнім розміром шматка породи  $\bar{d}$  досягається контактний тиск  $p$  на рівні межі міцності породи  $\sigma_b$ . Порода прагне вийти із зони руйнування, в результаті чого з'являється тангенціальна складова  $\tau$ . Нормальна і тангенціальна складова пов'язана законом Кулона:

$$\tau = \mu p = \mu \sigma_b \bar{d}, \quad (6)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт тертя породи по поверхнях дисків збагачувальної машини.

Процес дроблення маси можна розділити на 2 етапи. Перший, при  $\alpha_x \in [\alpha; \alpha - \varphi]$ , де  $\varphi$ , кут при якому досягається рівність контактних тисків  $p$  і межі міцності породи  $\sigma_b$ . Другий, при  $\alpha_x \in [\alpha - \varphi; 0]$ , коли  $\sigma_b$  зменшується до нуля. Розподіл нормального тиску  $p$ :

$$p(\alpha_x) = \frac{\sigma_b}{\alpha - \varphi} (\alpha - \alpha_x); \quad \alpha_x \in [\alpha; \alpha - \varphi]; \quad (7)$$

$$p(\alpha_x) = \frac{\sigma_b}{\varphi} \alpha_x; \quad \alpha_x \in [\alpha - \varphi; 0]. \quad (8)$$

Знайдемо необхідний момент для обертання дисків при дробленні породи шляхом розгляду елементарної частини дуги  $d\alpha$  шириною і висотою рівною середньому розміру маси  $\bar{d}$  на радіусі дроблення  $R$ . Площа  $S$  елементарної частини дуги  $d\alpha$ :

$$S = R\bar{d}d\alpha. \quad (9)$$

Опір обертанню дисків створюють тангенціальні контактні тиски. Момент від дії тангенціальних тисків:

$$M = \int_{\alpha}^{\alpha-\varphi} R \sin(\alpha_x) \mu \frac{\sigma_b}{\alpha-\varphi} (\alpha-\alpha_x) R \bar{d} d\alpha + \int_{\varphi}^0 R \sin(\alpha_x) \mu \frac{\sigma_b}{\varphi} \alpha_x R \bar{d} d\alpha =$$

$$= \frac{R^2 \mu \sigma_b \bar{d} (\varphi (\sin(\varphi) + \sin(\alpha)) + \sin(\varphi - \alpha) + \alpha \cos(\varphi)) - \varphi^2 (\cos(\varphi - \alpha) + \cos(\varphi))}{\varphi \alpha - \varphi^2}. \quad (10)$$

Встановлення моменту опору обертання дисків при збагаченні вугілля дозволяє визначити потужність елетромехатронної системи і провести міцнісні розрахунки головних елементів.

За принципом сухого збагачення за тертям з силовим видаленням породи науково виробничим центром “Прес”, м. Носівка побудовано цілий ряд мехатронних комплексів для збагачення вугілля різного класу (рис. 8).



Рисунок 8 – Машини сухого збагачення вугілля

Представлені машини успішно пройшли випробування на геотехнічних підприємствах ДХК «Павлоградвугілля» з підтвердженням високих техніко-економічних показників.

**Висновки.** Переваги представлених нових способів збагачення за тертям з силовим видаленням породи, відносно малі енергоємність і масово-габаритні параметри, дозволяють використати їх в умовах геотехнічного підприємства без транспортування маси на збагачувальні фабрики.

Встановлені залежності розподілів тисків в зонах дії робочих органів на масу дозволяють встановити основні енергосилові параметри мехатронних систем збагачення і провести міцнісні розрахунки.

#### Перелік літератури

1. Патент 33930, МПК В02С 1/00 Верстатмашина виборного дроблення/Волошин Г. М.; Волошин А. Г.; Томурко О. А. власники і винахідники. – № 99042460; заявл. 29.04.1999; опубл. 15.08.2003, Бюл. № 8.
2. Самилін В. Спеціальні методи збагачення корисних копалин [Текст] : Курс лекцій / В. Самилін, В. Білецький ; Донецький національний технічний ун-т, Донецьке відділення Наукового товариства ім. Шевченка. - Донецьк : Східний видавничий дім, 2003. - 115 с.
3. Патент 47665, МПК В02С 4/00 Валкова дробарка/Шевчук С.П.; Шевчук О. С.; Зайченко С.В.; Киричук В.А. власники і винахідники. – № а200910296; заявл. 09.10.2009; опубл. 25.02.2010, Бюл. № 9.
4. Целиков, А. И. Теория продольной прокатки/А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. - М. : Металлургия, 1980. - 319 с.
5. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон; Пер. с англ. В. Э. Наумов, Ред. Р. В. Гольдштейн. - М. : Мир, 1989. - 509 с.
6. Патент 82266, МПК В02С 18/00 Машина виборного дроблення/Зайченко С.В.; Соколовський О.М.; Гарнець В.М.; Шевчук Н.А.власники і винахідники. – № u201301960; заявл. 18.02.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14/2013.

S.P. Shevchuk, S.V. Zaichenko, V.V. Vapnichna  
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"  
**RESOURCE MECHATRONIC COAL PREPARATION TECHNIQUES WITH THE POWER OF  
ROCK REMOVAL**

*The article presents the new energy saving dry separation methods for removing the friction force with breeds that do not require significant amounts of water and electricity. In order to establish power parameters built mechatronic models of the processes of enrichment due to friction, the implementation of which is held by numerical and analytical methods.*

*Depending on the pressure distribution obtained allow you to set the rotational resistance of the working bodies during the enrichment process.*

*It is found that with increasing the contact strength of the rock pressure increase linearly along the arc of the disc case of interaction and the concentrating parabolic machine according to the roll, which will increase the power consumption of the enrichment process.*

*The present methods of dry processing friction force the removal of rocks have been pilot-tested in the laboratory benches and industrial introduction.*

**Key words:** concentration, friction, rock, coal, resource.

**References:**

1. Patent 33930, IPC B02C 1/00 Machine crushing machine elective / Voloshin, G. M. ; Voloshin AG. ; Tomurko OA owners and inventors. - № 99042460; appl. 29.04.1999; publ. 15.08.2003, Bull. Number 8.
2. Samylin B. Special methods of mineral [Text]: Lectures / Samylin V., V. Beletsky; Donetsk National Technical University Press, Donetsk branch of the Scientific Society. Shevchenko. - Donetsk: East Publishing House, 2003. - 115 p.
3. Patent 47665, IPC B02C 4/00 Roller crusher / SP Shevchuk. ; Shevchuk O. C. ; Zaichenko SV. ; Kirichuk VA owners and inventors. - № a200910296; appl. 09.10.2009; publ. 25.02.2010, Bull. Number 9.
4. Tselykov, AI Theory prodolnoy prokatky A.Y. Tselykov, GS Nikitin, SE Rokotyuan. - Moscow: Metallurgy, 1980. - 319 p.
5. Mechanics of contact interaction / K. Johnson; Per. s English. B. E. Naumov, Ed. RV Goldstein. - Moscow: Mir, 1989. - 509 p.
6. Patent 82266, IPC B02C 18/00 Crushing electrol machine / Zaichenko SV. ; Sokolovsky AM. ; Garnets VM. ; Shevchuk N.A.vlasnyky and inventors. - № u201301960; appl. 02/18/2013; publ. 07.25.2013, Bull. № 14/2013.

**УДК 621.926**

**С.П. Шевчук**, д-р техн. наук, проф. **С.В. Зайченко**, д-р техн. наук, доц.  
**В.В. Вапнична** канд. техн. наук, доц.

**Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"**  
**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕХАТРОННЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЯ С  
СИЛОВЫМИ УДАЛЕНИЕМ ГОРНЫХ ПОРОД**

*В статье представлены новые энергоресурсосберегающие способы сухого обогащения по трению с силовым удалением породы, которые не требуют значительных расходов воды и электроэнергии. С целью установления энергосиловых параметров построены мехатронные модели процессов обогащения по трению, реализация которых проведена численным и аналитическим методами.*

*Полученные зависимости распределений давлений позволяют установить сопротивления вращению рабочих органов при проведении процесса обогащения.*

*Установлено, что с повышением прочности горной породы контактные давления растут линейно по дуге взаимодействия случае дисковой обогатительной машины и по параболической зависимости для валковой, что приведет к увеличению энергоёмкости процесса обогащения.*

*Представленные способы сухого обогащения по трению, с силовым удалением породы, прошли экспериментальную проверку на лабораторных стендах и промышленное внедрение.*

**Ключевые слова:** обогащение, трение, порода, уголь, ресурсосбережение.

Надійшла 08.09.2015  
Received 08.09.2015