

Козьмін Юрій Семенович – кандидат технічних наук, ІСМА НАН України, науковий співробітник лабораторії систем управління відділу технології вирощування монокристалів, м. Харків; тел.: (057) 341-01-45; e-mail: ukoz55@mail.ru.

Козьмин Юрій Семёнович – кандидат технических наук, ИСМА НАН Украины, научный сотрудник лаборатории систем управления отдела технологии выращивания монокристаллов, г. Харьков; тел.: (057) 341-01-45; e-mail: ukoz55@mail.ru.

Kozmin Yuriy Semenovich – Candidate of Engineering Sciences, ISMA NAS of Ukraine, Researcher of the Laboratory of Control Systems, Single Crystal Growth Technology Department, Kharkov, tel.: (057) 341-01-45; e-mail: ukoz55@mail.ru.

УДК 001.57

В. О. КОНДРАТЕЦЬ, А. М. МАЦУЙ

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ФОРМУВАННЯ ПОТОКУ ПУЛЬПИ У ПІСКОВОМУ ЖОЛОБІ ОДНОСПІРАЛЬНОГО КЛАСИФІКАТОРА

Представлені результати дослідження формування і руху потоку пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора. При співударянні пісків і води у пісковому жолобі створюється суміш з рівномірно розташованим твердим, яка не змінюється і в процесі руху пульпи. Змінна об'ємна продуктивність пісків класифікатора робить рух пульпи нерівномірним. За отриманими залежностями в певні моменти часу можливо визначити середню швидкість руху і висоту пульпи у пісковому жолобі, які однозначно характеризують умови формування потоку, дають можливість відтворення механізму взаємодії між масивами матеріалу та обґрунтування шляхів підвищення точності вимірювання технологічного параметра.

Ключові слова: спіральний класифікатор, піски, пісковий жолоб, пульпа, потік, швидкість, висота, витрата.

Вступ. Магнетитовий концентрат як продукт збагачення бідних залізних руд є основою сировини чорної металургії України, однак відрізняється підвищеною собівартістю в наслідок значних перевитрат електроенергії, куль і футеровки у першій стадії подрібнення – *класифікації*, які здійснюють здебільшого у кульових млинах і механічних односпіральних класифікаторах. Одним з важливих напрямів зменшення цих витрат, як вказано в [1], є автоматизація даних процесів. Недостатня вивченість процесів руху пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора стримує розробку ефективних засобів контролю об'ємної витрати рідкої суміші у відкритих потоках і, як наслідок, – автоматизацію технологічних процесів подрібнення вихідної руди у першій стадії, що призводить до значних економічних збитків. Зважаючи на те, що дана публікація спрямована на визначення одного з основних технологічних параметрів механічного спірального класифікатора – його піскової продуктивності, її тема є актуальною.

Аналіз останніх досліджень. В роботі [2] вказується на важливість автоматизації перших стадій як подрібнення, так і збагачення. Поряд з цим акцентується увага на відсутності надійних засобів контролю необхідної точності або на значній їх вартості [3], на необхідності розробки інформаційних засобів [1], на важливості автоматичного вимірювання витрати продуктів [4]. В останній час все ширше починають застосовуватись алгоритмічні методи визначення параметрів у збагачувальних технологіях [5, 6], які дозволяють підвищити точність отриманої інформації при вимірюванні деяких параметрів навіть з великою похибкою. Для цього іноді виникає необхідність підвищувати точність вимірювання інших параметрів. У замкненому циклі подрібнення вихідної руди таким параметром є об'ємна витрата пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора. У свій час були запропоновані способи визначення піскової продуктивності механічних спіральних класифікаторів [7, 8, 9], які удосконалювалися і зводилися до обчислення продуктивності за формулами з використанням великої кількості конструктивних і технологічних параметрів. Однак їх недоліком є велика кількість параметрів, які враховуються, і необхідний час їх введення і обчислення, що фактично створює запізнення. Перша спроба прямого вимірювання об'ємної витрати пульпи у пісковому жолобі відмічена в роботі [10]. Згодом були розроблені теоретичні положення даного методу [11], однак для створення діючих вимірювальних пристроїв, визначення умов забезпечення їх найвищої точності, враховуючи і формування хвильового руху пульпи, необхідно мати повну уяву про її рух. Рух пульпи у пісковому жолобі двоспірального класифікатора досліджувався в роботі [12], однак тут умови відрізняються від односпірального класифікатора і результати не можуть бути використані. Отже, ніхто не досліджував умови формування потоку пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора.

Постановка задачі. Метою даної роботи є встановлення умов формування потоку пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора шляхом дослідження взаємодії пісків з днищем транспортуючого засобу, руху пульпи у ньому, розробки математичних моделей процесу та його моделювання і аналізу результатів.

Взаємодія пісків з пісковим жолобом. Дослідження умов формування потоку пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора проведемо на технологічному агрегаті 1КСН-30, вузол розвантаження пісків у якому спрощено показано на рис. 1. Висота h падіння пісків з трикутника BCD (рис. 1) дорівнює

$$h = BC = CD \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (1)$$

Враховуючи, що $CD = 1,7$ м, висота падіння пісків $h = 0,58$ м.

Можливо рахувати, що піски односпірального класифікатора містять твердого 88 %, а води – 12 % [13], що при густині твердого 3300 кг/м^3 відповідає густині суміші 2586 кг/м^3 . Тобто, піски спірального класифікатора достатньо густі і падають вони в пісковий жолоб з висоти $h = 0,58$ м з силою:

$$F_{II} = mg, \quad (2)$$

m – маса пісків; g – прискорення земного тяжіння.

Нормальна складова сили F_{II} (рис. 1) дорівнює

$$F_{II1} = mg \cos \alpha. \quad (3)$$

Силу F_{II1} можливо розглядати як до усього масиву пісків, так і стосовно окремої частинки твердого. При цьому швидкість руху окремої частинки твердого буде дорівнювати [14]

$$v_{II} = \sqrt{2gh}. \quad (4)$$

Допустимо, що піски складаються з сферичних частинок твердого однакового розміру. Лобовий опір руху тіла в середовищі буде [14] дорівнювати

$$F_{II} = C \frac{\rho_C S_{II} v_{II}^2}{2} = C \rho_C S_{II} v_{II}^2 / 2, \quad (5)$$

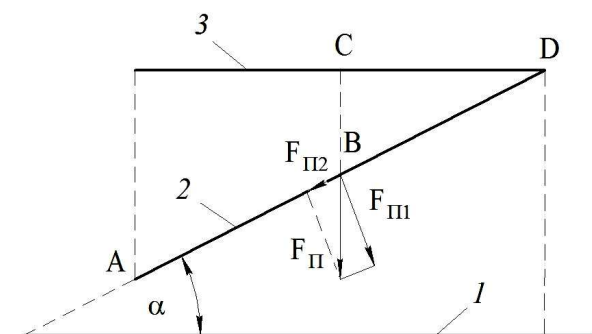


Рис. 1 – Спрощене подання вузла розвантаження пісків у односпіральному класифікаторі:

1 – горизонталь; 2 – пісковий жолоб; 3 – пісковий поріг.

ρ_C – густина середовища; C – безрозмірна величина, яку називають коефіцієнтом лобового опору; S_{II} – площа найбільшого поперечного перерізу тіла; v_{II} – швидкість руху тіла (або середовища).

Коефіцієнт лобового опору для кулі $C = 0,1 \dots 0,4$. Автомобіль має $C = 0,4$ [14]. Враховуючи, що тверде пісків має неправильну, складну форму, можливо з гострими кутами, коефіцієнт лобового опору для твердого пісків слід прийняти $C = 0,4$.

Піски механічного односпірального класифікатора можуть містити частинки твердого крупністю до 10 мм, розмір 5 мм може досягати 2,6 %, розмір 3 мм – 12 %, 2 мм – 14,9 %. Отже, можливо рахувати самим характерним розмір частинок твердого, що дорівнює 3 мм. Для даної крупності твердого зробимо розрахунки. Знайдемо і порівняємо між собою силу, яку розвиває частинка твердого розміром 3 мм при падінні з висоти h , і силу лобового опору проникненню її в середовище пісового продукту.

Для сферичних частинок залежність (2) прийме вигляд

$$F_{II} = \frac{\pi d_{II}^3 \rho_T g \cos \alpha}{6}, \quad (6)$$

d_{II} – діаметр частинки твердого; ρ_T – густина твердого.

Сила лобового опору сферичної частинки

$$F_{II} = C \pi \rho_C d_{II}^2 v_{II}^2 / 8. \quad (7)$$

З врахуванням (4) залежність (7) подамо у вигляді

$$F_{II} = C \pi \rho_C d_{II}^2 gh / 4. \quad (8)$$

Якщо $F_{II} = F_{II}$, то досягаємо межі, коли частинка твердого вже не може увійти в середовище пісків. Тоді знайдемо цю умову, прирівнявши праві частини виразів (6) і (8). В результаті

$$\frac{d_{II} \rho_T \cos \alpha}{3} = \frac{C \rho_C h}{2}. \quad (9)$$

Для виконання умови проникнення частинки у піскове середовище повинна виконуватись умова

$$\frac{d_{II} \rho_T \cos \alpha}{3} > \frac{C \rho_C h}{2}. \quad (10)$$

З врахуванням конструктивних сталих h і α вузла розвантаження пісків і прийнятих параметрів нерівність (10) не виконується, оскільки $3,12 < 299,976$, кг/м^2 .

При зіткненні пісків з дном пісового жолоба вони потрапляють у рідинне середовище, створене водою, що подається у пісковий жолоб механічного односпірального класифікатора. Під дією сили F_{II} (3), яка складає наближено 70 % F_{II} , вода протискується і потрапляє у товщу пісків, рівномірно розріджуючи їх. При

$Q_{ВЖ} = const = 24,3 \text{ м}^3/\text{год}$ густина пульпи може доходити до $2100 \text{ кг}/\text{м}^3$ [15]. За цих умов права сторона нерівності (10) прийме значення $243,6 \text{ кг}/\text{м}^2$, що знову набагато більше $3,12 \text{ кг}/\text{м}^2$. Якщо розмір твердого зменшувати, то ліва частина (10) буде ще меншою. Отже, при співударянні пісків і дна піскового жолоба вони розріджуються і ні за яких умов розшарування пульпи не може здійснюватись. Пульпа буде мати рівномірний розподіл твердого у своєму об'ємі.

Особливості руху пульпи у пісковому жолобі. При падінні пісків у пісковий жолоб класифікатора створюється також сила $F_{П2}$, прикладена до рідкої суміші в момент дотику. Вона дорівнює $F_{П2} = F_{П} \sin \alpha = 0,3228 F_{П}$, яка значно менша нормальної складової сили, що притискує піски до дна піскового жолоба в момент удару, однак достатня для початку руху матеріалу вздовж нього.

Рух суміші води і твердого завжди є турбулентним [16]. Він характеризується тим, що біля стінок спочатку зберігається деякий шар рідини, яка рухається з малими швидкостями. Цей шар називають *ламінарною плівкою*. Її товщина справляє суттєвий вплив на розподіл швидкостей у потоці і відбувається це у поєднанні з шорсткістю стінок русла [17]. Основна маса рідин при турбулентному режимі руху характеризується більш рівномірним розподілом швидкостей. За абсолютним значенням швидкості більші, ніж при ламінарному русі. В цілому рух рідини супроводжується інтенсивним перемішуванням і пульсаціями швидкостей та тисків. Рух окремих частинок виявляється неупорядкованим, траєкторії часто мають вигляд вигадливих кривих. Це пояснюється тим, що при турбулентній течії поряд з основним поздовжнім пересуванням рідини вздовж русла мають місце поперечні переміщення та обертовий рух окремих об'ємів рідини.

Турбулентному потоку притаманні три статистичні характеристики. До перших статистичних характеристик відносять інтенсивності турбулентності в різних напрямках. Другою статистичною характеристикою є масштаб турбулентності, коли розрізняють *мілкомасштабну* і *крупномасштабну турбулентності*. Спектр турбулентності є третьою її характеристикою. Це функція розподілу кінетичної енергії пульсацій за частотами у часі [18]. У ламінарній плівці частотні (спектральні) характеристики переважно мають коливання більш низької частоти порівняно з коливаннями поза цим шаром. Так, у ламінарній плівці на пластині в поперечному перерізі, що відповідає числу Рейнольдса $Re = 650000$, переважне значення мають частоти до $40 \dots 50$ Гц, при $Re = 1600000$ – до 20 Гц, а поза цим шаром – наближено 100 Гц. Частка високих частот (близько 1000 Гц) зовсім незначна [18]. Під дією таких коливань відбувається інтенсивне перемішування рухомого середовища, його називають *турбулентним*. Воно супроводжується перемішуванням частинок твердого, які знаходяться у воді [18], забезпечуючи рівномірний склад як за крупністю твердого, так і за його вмістом.

Математичні моделі. Витрата пісків у точці розвантаження відрізняється нерівномірністю і циклічністю [19], що породжує нерівномірність руху пульпи і в пісковому жолобі. У гідравліці нерівномірний рух рідини розглядають у вигляді *бору*, *прибою*, *хвилювання* та *корабельних хвиль* [20], а також *гідравлічного стрибка* [16]. Вивчення процесів руху пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора показало, що вони не відповідають умовам перерахованих гідравлічних режимів і їх теорію застосувати не можливо. Враховуючи це, процеси руху пульпи у пісковому жолобі односпірального класифікатора необхідно описувати окремим підходом.

В точці сходження пісків у пісковий жолоб механічного односпірального класифікатора зустрічаються два потоки – пісків з об'ємною витратою $Q_{ВП}$ і води з об'ємною витратою $Q_{ВЖ} = const = 24,3 \text{ м}^3/\text{год}$ [15], які створюють загальний потік пульпи з витратою $Q_{ВПЖ}$. Для даної точки можливо записати рівняння балансу об'ємної витрати в потоках пульпи, виразивши витрату рідкої суміші в пісковому жолобі залежністю

$$Q_{ВПЖ} = B \cdot h \cdot v_{CP}, \quad (11)$$

B – ширина піскового жолоба; h – висота потоку; v_{CP} – середня швидкість руху пульпи.

Однак, враховуючи, що в (11) невідомі параметри h і v_{CP} , дану залежність реалізувати не можливо. Для таких гідравлічних систем більш доцільною є залежність [16]

$$Q_{ВПЖ} = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (12)$$

ω – площа поперечного перерізу потоку пульпи; R – гідравлічний радіус; i – нахил піскового жолоба; C – коефіцієнт Шезі.

Для піскового жолоба класифікатора гідравлічний радіус можливо подати у вигляді

$$R = \frac{Bh}{B + 2h}. \quad (13)$$

Коефіцієнт Шезі також є функцією висоти потоку h . Отже, в (12) є лише одна невідома величина h , оскільки ω , C і R при вибраних конструктивних параметрах гідросистеми визначаються лише висотою потоку пульпи у пісковому жолобі.

З розглянутого видно, що змінний у часі потік пісків у гідравлічній системі автоматично компенсується варіюванням його висоти h у пісковому жолобі. Лише за цієї умови збережеться матеріальний баланс і неперервне транспортування матеріалу. Між змінною витратою пісків $Q_{ВП}$ і висотою h пульпи можливо знайти зале-

жність, однак це зробити нелегко в наслідок складності математичного виразу, який містить параметр h . Цю складність можливо обійти, якщо в конкретні моменти часу знаходити сумарну витрату пісків і води в пісковий жолоб і підставляти це значення у вираз залежності середньої швидкості руху пульпи в пісковому жолобі від її витрати. Відповідно аналогічній залежності, що зв'язує висоту потоку і швидкість руху пульпи у пісковому жолобі визначаємо висоту h . Знаючи параметри v і h та тривалості подачі пісків можливо моделювати формування потоку пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора.

Отримасмо залежності середньої швидкості руху пульпи у пісковому жолобі від її об'ємної витрати та висоти потоку від середньої швидкості переміщення пульпи.

Для умов рівномірного руху пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора отримано рівняння

$$v_{CP} = \frac{(23+1/n)Bh\sqrt{i}}{\left(\sqrt{Bh/(2h+B)} + 23n\right)(2h+B)}, \quad (14)$$

n – шорсткість стінок піскового жолоба.

Виразимо висоту потоку h з рівняння (11) і підставимо її значення в (14). В результаті цього отримаємо

$$v_{CP} = \frac{(23+1/n)B\sqrt{i}Q_{VITJK}}{\left(\sqrt{BQ_{VITJK}/(2Q_{VITJK} + B^2v_{CP})} + 23n\right)(2Q_{VITJK} + B^2v_{CP})}. \quad (15)$$

Після ряду перетворень отримаємо

$$\begin{aligned} & 23^2 n^2 B^6 v_{CP}^5 + B^4 (6 \cdot 23^2 n^2 - B) Q_{VITJK} v_{CP}^4 + \\ & + 2B^2 Q_{VITJK} \left\{ 6 \cdot 23^2 n^2 Q_{VITJK} - B \left[23(23+1/n) B^2 \sqrt{i} \cdot n + 2Q_{VITJK} \right] \right\} v_{CP}^3 + \\ & + 4Q_{VITJK}^2 \left[(2 \cdot 23^2 n^2 - B) Q_{VITJK} - 46(23+1/n) B^3 \sqrt{i} \cdot n \right] v_{CP}^2 + \\ & + (23+1/n) B \sqrt{i} Q_{VITJK}^2 \left[(23+1/n) B^3 \sqrt{i} - 184 Q_{VITJK} n \right] v_{CP} + \\ & + 2(23+1/n)^2 B^2 i Q_{VITJK}^3 = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Рівняння (16) зв'язує середню швидкість руху пульпи в пісковому жолобі односпірального класифікатора з її витратою. В ньому середня швидкість руху пульпи визначається у м/с за відомою витратою у м³/с. У рівнянні (16) конструктивні сталі гідравлічної системи дорівнюють $n = 0,025$, $i = 0,3228$, $B = 0,3$ м. З врахуванням конструктивних сталих рівняння (16) подамо у вигляді

$$\begin{aligned} & 0.000241v_{CP}^5 + 0.013638Q_{VITJK}v_{CP}^4 + 0.108Q_{VITJK} \left[3.30625Q_{VITJK} - (0.926233 + Q_{VITJK}) \right] v_{CP}^3 + \\ & + 4Q_{VITJK}^2 (0.36125Q_{VITJK} - 1.111484) v_{CP}^2 + 10.73898Q_{VITJK}^2 (0.9665082 - 4.6Q_{VITJK}) v_{CP} + 115.30739Q_{VITJK}^3 = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Рівняння (17) дозволяє визначати середню швидкість потоку пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора за відомою витратою суміші. Відповідно умові *Стодолі* щодо стійкості лінійних систем автоматичного регулювання розв'язок рівняння (17) має хоч би один додатний дійсний корінь або додатну дійсну частину комплексних спряжених коренів, оскільки знаки його коефіцієнтів відрізняються. При розв'язанні рівняння (17) на персональному комп'ютері в середовищі MathCAD 2000 Professional встановлено, що його розв'язок містить два комплексні спряжені корені, один від'ємний і два додатні дійсні різні корені. Розв'язок у вигляді комплексних спряжених коренів і від'ємного кореня у даній задачі не має фізичного змісту. Фізичний зміст задача матиме при певному додатному корені. Встановимо, який саме додатний корінь необхідно приймати до уваги.

Механічний односпіральний класифікатор має ширину близько 3,6 м. Тому можливо стверджувати, що пульпа в пісковому жолобі рухається на відстані 2,3 м. Враховуючи нахил піскового жолоба 34 %, висота пониження пульпи при транспортуванні її до завиткового живильника складає $h = 0,782$ м. Визначимо швидкість вільного падіння пульпи на таку висоту. При вільному падінні тіл з нульовою початковою швидкістю, що відповідає умовам спірального класифікатора, висота (шлях) опусується залежністю [14]

$$h = gt^2 / 2, \quad (18)$$

g – прискорення земного тяжіння; t – час падіння тіла.

Час падіння пісків на висоту h з (18) буде дорівнювати

$$t = \sqrt{2h/g} = 0,4, \text{ с}, \quad (19)$$

а швидкість в процесі вільного падіння тіла з нульовою початковою швидкістю визначається залежністю [14] і дорівнює

$$v = gt = 3.924, \text{ м/с}. \quad (20)$$

За результатами моделювання руху пісків у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора

без подачі додаткової води відповідно рівнянню (17) і витратам піскового матеріалу при розвантаженні встановлена максимальна швидкість серед більших значень додатних коренів, яка дорівнює 2,88 м/с, що практично не можливо у даній гідравлічній системі. При подачі додаткової води у пісковий жолоб швидкість руху пульпи ще збільшиться, а більше значення додатного кореня наблизиться до швидкості вільного падіння тіла. Тому при моделюванні слід приймати до уваги менше значення додатного кореня, отриманого при розв'язанні рівняння (17).

Залежність висоти потоку пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора від середньої швидкості її руху отримаємо з рівняння (14). Виконавши ряд перетворень, рівняння (14) запишемо так:

$$\left\{ (23+1/n)B\sqrt{i} \left[(23+1/n)B\sqrt{i} - 92nv_{CP} \right] + 2v_{CP}^2 (2 \cdot 23^2 n^2 - B) \right\} h^2 + Bv_{CP} \left[4 \cdot 23^2 n^2 v_{CP} - 46n(23+1/n)B\sqrt{i} - Bv_{CP} \right] h + 23^2 n^2 B^2 v_{CP}^2 = 0. \quad (21)$$

Підставимо в (21) значення прийнятих конструктивних параметрів $B = 0,3\text{ м}$, $n = 0,025$, $i = 0,3228$ і отримаємо

$$(0.7225v_{CP}^2 - 24.6977v_{CP} + 115.30744)h^2 + v_{CP} (0.30675v_{CP} - 3.704654)h + 0.029756v_{CP}^2 = 0. \quad (22)$$

Дане рівняння за відомою середньою швидкістю руху пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора дозволяє знаходити її рівень у транспортному засобі. Воно має два кореня. Розв'язання рівняння (22) на персональному комп'ютері показало, що обидва корені додатні. При моделюванні необхідно брати одне конкретне значення.

Підставимо в рівняння (22) значення середньої швидкості руху пульпи $v_{CP} = 1\text{ м/с}$. В результаті отримаємо

$$91.33224h^2 - 3.397904h + 0.029756 = 0, \quad (23)$$

яке дає розв'язки $h_1 = 0,0231\text{ м}$ і $h_2 = 0,0141\text{ м}$. Після підстановки у вихідне рівняння прийнятих значень конструктивних параметрів транспортного засобу і висоти потоку $h_1 = 0,0231\text{ м}$ отримуємо середню швидкість руху пульпи у пісковому жолобі $v_{CP} = 1\text{ м/с}$. Підстановка $h_2 = 0,0141\text{ м}$ дає значення середньої швидкості $v_{CP} = 0,6666\text{ м/с}$, що не відповідає умові задачі. Тому в процесі моделювання необхідно брати більші значення кореня рівняння (22).

Результати моделювання та їх аналіз. Використовуючи залежності (17) і (22) виконувалося моделювання умов формування потоку пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора. Рівняння (17) встановлює зв'язок між об'ємною витратою пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора і її середньою швидкістю. Тобто, рахуючи піски рухомими, визначаємо їх миттєву витрату у пісковий жолоб, а відповідно залежності (17) знаходимо середню швидкість рівномірного їх руху у приймальній пристрій завиткового живильника. За цими ж даними знаходимо відповідно (22) миттєве значення рівня пульпи у пісковому жолобі. Результати моделювання, виконані в діапазоні зміни витрати пісків за один цикл сходження у пісковий жолоб, приведені на рис. 2.

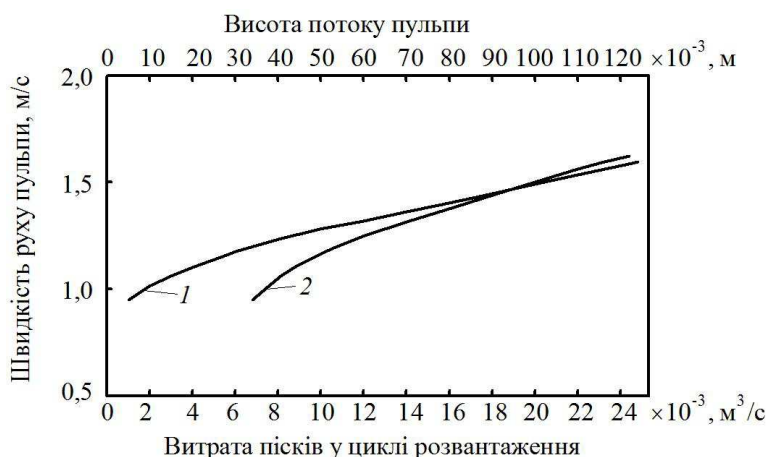


Рис. 2 – Результати моделювання руху пісків у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора при їх розвантаженні в межах одного циклу:

1 – залежність швидкості руху від витрати пісків; 2 – залежність висоти потоку пісків від швидкості.

З рис. 2 видно, що об'ємна витрата пісків за один цикл їх сходження у пісковий жолоб при повному навантаженні змінюється в достатньо широких межах. При цьому охоплюється широкий діапазон варіювання як середньої швидкості руху пульпи у пісковому жолобі механічного односпірального класифікатора, так і висоти її потоку. На підставі проведених досліджень з'являється можливість визначення миттєвих значень середньої швидкості руху пульпи і відповідних значень висоти потоку для будь-якого миттєвого значення об'ємної витрати пісків у пісковий жолоб механічного односпірального класифікатора. Це дозволяє отримувати основні показ-

ники потоку послідовно в часі за об'ємною витратою зійшовших пісків – об'ємну витрату пульпи у пісковому жолобі, миттєве значення середньої швидкості руху потоку та його висоти. Вони однозначно характеризують умови формування потоку рідини у пісковому жолобі механічного односпіралного класифікатора і дають можливість побудови механізму взаємодії між масивами пульпи в процесі її руху з тим, щоб найбільш ефективно сканувати її поверхню і найбільш точно визначати об'ємну витрату рідкої суміші.

Висновки. Встановлено, що при розвантаженні пісків механічного односпіралного класифікатора вода, яка подається у пісковий жолоб, ефективно проходить у пісковий продукт при співударянні пісків і дна піскового жолоба. При цьому тверде не розшаровується ні за крупністю, ні за концентрацією частинок. В процесі руху в наслідок турбулентності частинки твердого знаходяться в положенні рівномірного розташування у зваженому стані. Змінна об'ємна продуктивність пісків механічного спіралного класифікатора робить рух пульпи нерівномірним. Середню швидкість цього руху і висоту потоку у певні моменти часу можливо визначати за отриманими залежностями. Вони однозначно характеризують умови формування потоку, дають можливість відтворення механізму взаємодії між масивами пульпи та обґрунтування шляхів підвищення точності вимірювання технологічного параметра.

Проведені дослідження відкривають перспективу вивчення закономірностей формування потоку пульпи у пісковому жолобі механічного односпіралного класифікатора та підвищення точності вимірювання об'ємної витрати пульпи у даному процесі.

Список літератури: 1. Пивняк Г. Г., Вайсберг Л. А., Кириченко В. И. и др. Измельчение. Энергетика и технология. – М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2007. – 296 с. 2. Азарян А. А., Киреев Ю. Ю., Кучер В. Г. Автоматизация первой стадии измельчения, классификации и магнитной сепарации – реальный путь повышения эффективности обогащения железных руд // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – 2014. – Вип. 36. – С. 276 – 280. 3. Купін А. І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології. – Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008. – 204 с. 4. Морозов В. В., Топчаев В. П., Улитенко К. Я. и др. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2013. – 512 с. 5. Кондратець В. О., Сербул О. М. Ідентифікація співвідношення руда/вода на вході кульового млина // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузево машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ. – 2006. – Вип. 17. – С. 265 – 272. 6. Кондратець В. О., Мацуї А. М. Ідентифікація співвідношення руда/вода в процесі подрібнення пісків класифікатора // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – №3. – С. 8 – 12. 7. А.с. 1269838 СССР, МКИ В 03 В 13/00. Способ определения производительности спирального классификатора по пескам / В. И. Дмитриев (СССР). – №3904014/22–03; заявл. 27.05.85; опубл. 15.11.86, Бюл. №42. 8. А.с. 1530258 СССР, МКИ В 03 В 13/00. Способ определения производительности спирального классификатора по пескам / Е. Ф. Морозов (СССР). – №4385577/22–03; заявл. 29.02.88; опубл. 23.12.89, Бюл. №47. 9. А.с. 1659102 СССР, МКИ В 03 В 13/00. Способ оперативного определения производительности спирального классификатора по пескам / В. И. Дмитриев (СССР). – №4645509/03; заявл. 19.12.88; опубл. 30.06.91, Бюл. №24. 10. А.с. 570398 СССР, МКИ В 03 В 13/04. Устройство для измерения циркулирующей загрузки / Ф. Н. Дежарев, А. А. Мерзляков, В. А. Кондратец, Л. П. Байда, Н. В. Гончаров (СССР). – №1676560/03; заявл. 28.06.71; опубл. 30.08.77, Бюл. №32. 11. Кондратець В. О. Теоретичне дослідження сканування поверхні відкритих матеріальних потоків променями незмінної довжини // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – 2013. – Вип. 35. – С. 174 – 178. 12. Кондратець В. О., Мацуї А. М. Дослідження впливу піскового потоку на стан пульпи у завитковому живильнику // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузево машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ. – 2007. – №19. – С. 107 – 114. 13. Кондратець В. А. Исследование влагосодержания песков двухспиральных механических классификаторов в промышленных условиях // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – 2014. – Вип. 36. – С. 168 – 172. 14. Кузмичев В. Е. Законы и формулы физики. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с. 15. Кондратець В. О., Сербул О. М. Теоретичне дослідження розрідження пісків односпіралного класифікатора джерелом з незмінною витратою води // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузево машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ. – 2013. – №26. – С. 173 – 180. 16. Чузаев Р. П. Гидравлика. – Л.: Энергия, 1971. – 552 с. 17. Дідур В. А., Савченко О. Д., Пастушенко С. І. и др. Гідравліка, сільськогосподарське водопостачання та гідропривод. – Запоріжжя: Прем'єр, 2005. – 464 с. 18. Лоїцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с. 19. Мацуї А. М. Математичне моделювання формування піскового тіла у міжвитковому просторі механічного спіралного класифікатора // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів: журнал. – 2015. – Том 7. – Вип. 4. – С. 9 – 17. 20. Триккер Р. Бор, прибой, волнение и корабельные волны / Р. Триккер. : [пер с англ. Г. Е. Левитиной]. – Л.: Гидрометеорологическое изд., 1969. – 286 с.

References: 1. Pivnyak, G. G., Vaisberg, L. A., Kirichenko, V. I. *Izmel'chenie. Energetika i tekhnologiya* [Grinding. Energy and technology]. Moscow, Izdatel'skii dom «Ruda i Metally», 2007. 296 p. 2. Azaryan, A. A., Kyrenko, Yu. Yu. and Kucher V. G. *Avtomatizatsiya pervoi stadii izmel'cheniya, klassifikatsii i magnitnoi separatsii – real'nyi put' povysheniya effektivnosti obogashcheniya zheleznykh rud* [Automation of the first grinding stage, classification and magnetic separation – a real way to improve the efficiency of iron ore enrichment]. *Visnyk Kryvoriz'kogo nacional'nogo universytetu* [Bulletin of the Kryvyi Rih National University]. Kryvyi Rih, 2014, no. 36, pp. 276–280. 3. Kupin, A. I. *Intelektual'na identyfikatsiya ta keruvannya v umovah procesiv zbagachuvальної tehnologiyi* [Intelligent identification and management process in terms of enrichment technology]. Kryvyi Rih, Vydavnytstvo KТУ, 2008. 204 p. 4. Morozov, V. V., Topchaev, V. P., Ulitenko, K. Ya. *Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopayemykh* [Development and application of the automated control systems in mineral processing]. Moscow, Izdatel'skii dom «Ruda i Metally», 2013. 512 p. 5. Kondratec', V. O. and Serbul, O. M. *Identyfikatsiya spivvidnoshennya ruda/voda na vkhodi kul'ovogo mlyna* [Identification of ore / water ratio at the entrance of a ball mill]. *Tekhnika v sil'skogospodars'komu vyrobnytctvi, galuzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiya: zb. nauk. prac' KNTU* [Equipment for agriculture, branch mechanical engineering, automation: digest of scientific papers of the KNTU]. Kirovograd, 2006, no. 17, pp. 265–272. 6. Kondratec', V. O. and Macuj, A. M. *Identyfikatsiya spivvidnoshennya ruda/voda v procesi podribnennya piskiv klasyfikatora* [Identification of ore / water ratio in classifier sand grinding]. *Visnyk Vynyc'kogo politekhnichnogo instytutu* [Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute]. Vinnitsa, 2009, no. 3, pp. 8–12. 7. Dmitriev, V. I. (SSSR). *Sposob opredeleniya proizvoditel'nosti spiral'nogo klassifikatora po peskam* [A method of determining the productiveness of a spiral classifier on sand]. Patent SSSR, A.s. 1269838 SSSR, MKI V 03 V 13/00, no. 3904014/22–03, заявл. 27.05.85, опубл. 15.11.86, Byul. no. 42. 8. Morozov, E. F. (SSSR). *Sposob opredeleniya proizvoditel'nosti spiral'nogo klassifikatora po peskam* [A method of determining the productiveness of a spiral classifier on sand]. Patent SSSR, A.s. 1530258 SSSR, MKI V 03 V 13/00, no. 4385577/22–03, заявл. 29.02.88, опубл. 23.12.89, Byul. no. 47. 9. Dmitriev, V. I. (SSSR). *Sposob operativnogo opredeleniya proizvoditel'nosti spiral'nogo klassifikatora po peskam* [A method of operative determining the productiveness of a spiral classifier on sand]. Patent SSSR, A.s. 1659102 SSSR, MKI V 03 V 13/00, no. 4645509/03, заявл. 19.12.88, опубл. 30.06.91, Byul. no. 24. 10. Degtyarev, F. N., Merzlyakov, A. A., Kondratets, V. A., Baida, L. P., and Goncharov, N. V. (SSSR). *Ustroystvo dlya izmereniya tsirkuliruyushchei nagruzki* [A device for measuring circulating load]. Patent SSSR, A.s. 570398 SSSR, MKI V 03 V 13/04, no. 1676560/03, заявл. 28.06.71, опубл. 30.08.77, Byul. no. 32. 11. Kondratec', V. O. *Teoreticheskie doslidszhennya skanuvannya poverhni vidkrytykh material'nykh potokiv promenyamy nezminnoyi dovezhyny* [The theoretical studies of scanning the surface of open material flow by rays of constant length]. *Visnyk Kryvoriz'kogo nacional'nogo universytetu* [Bulletin of the Kryvyi Rih National University]. Kryvyi Rih, 2013, no. 35, pp.

174–178. **12.** Kondratec', V. O. and Macuj, A. M. Doslidzhennya vplyvu piskovogo potoku na stan pul'py u zavytkovomu zhyvylynyku [The study of the influence of sand flow on the state of the pulp in a snail feeder]. *Tekhnika v sil'skogospodars'komu vyrobnytvi, galuzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiya : zb. nauk. prac' KNTU* [Equipment for agriculture, branch mechanical engineering, automation: digest of scientific papers of the KNTU]. Kirovograd, 2007, no. 19, pp. 107–114. **13.** Kondratets, V. A. Issledovanie vlagosoderzhaniya peskov dvukhspral'nykh mekhanicheskikh klassifikatorov v promyshlennykh usloviyakh [The research of moisture content of double-spiral mechanical classifier sands in the industrial conditions]. *Visnyk Kryvoriz'kogo nacional'nogo universytetu* [Bulletin of the Kryvyi Rih National University]. Kryvyi Rih, 2014, no. 36, pp. 168–172. **14.** Kuzmichev, V. E. *Zakony i formuly fiziki* [The laws and formulas of physics]. Kyiv, Naukova dumka, 1989. 864 p. **15.** Kondratec', V. O. and Serbul, O. M. Teoretychne doslidzhennya rozridzhennya piskiv odnospral'nogo klasyfikatora dzherelom z nezminnoyu vytratoju vody [The theoretical study of liquefaction of single spiral classifier sand by source with constant water flow]. *Tekhnika v sil'skogospodars'komu vyrobnytvi, galuzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiya : zb. nauk. prac' KNTU* [Equipment for agriculture, branch mechanical engineering, automation: digest of scientific papers of the KNTU]. Kirovograd, 2013, no. 26, pp. 173–180. **16.** Chugaev, R. R. *Gidravlika* [Hydraulics]. Leningrad, Energiya, 1971. 552 p. **17.** Didur, V. A., Savchenko, O. D., Pastushenko, S. I. and Movchan, S. I. *Gidravlika, sil'skogospodars'ke vodopostachannya ta gidropryvod* [Hydraulics, agricultural water supply and hydraulic drive]. Zaporozhye, Prem'jer, 2005. 464 p. **18.** Loitsyanskii, L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [The mechanics of fluid and gas]. Moscow, Nauka, 1987. 840 p. **19.** Macuj, A. M. Matematychno modelyuvannya formuvannya piskovogo tila u mizhvytkovomu prostori mekhanichnogo spiral'nogo klasyfikatora [Mathematic modeling of formation of sand body in mechanical space of spiral classifier]. *Avtomatyzacija tehnologichnyh i biznes-procesiv* [Automation of technical and business processes]. Odessa, 2015, vol. 7, issue 4, pp. 9–17. **20.** Trikker, R. *Bor, priboi, volnenie i korabel'nye volny* [Bore, surf, waving, and ship waves]. Leningrad, Gidrometeorologicheskoe izd., 1969. 286 p.

Надійшла (received) 25.02.2016

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Кондратець Василь Олександрович – доктор технічних наук, професор, Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград; тел.: (0522) 56-70-91; e-mail: matsuyan@mail.ru.

Кондратець Василь Олександрович – доктор технических наук, профессор, Кировоградский национальный технический университет, г. Кировоград; тел.: (0522) 56-70-91; e-mail: matsuyan@mail.ru.

Kondratets Vasiliy Aleksandrovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Kirovograd National Technical University, Kirovograd; tel.: (0522) 56-70-91; e-mail: matsuyan@mail.ru.

Мацуй Анатолій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград; тел.: (0522) 56-70-91; (050) 060-48-70; e-mail: matsuyan@mail.ru.

Мацуй Анатолій Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Кировоградский национальный технический университет, г. Кировоград; тел.: (0522) 56-70-91; (050) 060-48-70; e-mail: matsuyan@mail.ru.

Matsui Anatolii Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Kirovograd National Technical University, Kirovograd; tel.: (0522) 56-70-91; (050) 060-48-70; e-mail: matsuyan@mail.ru.

УДК 621.43

А. М. ЛЕВТЕРОВ, О. А. ЛЕВТЕРОВ, Л. И. ЛЕВТЕРОВА**ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЛОЖНЫХ ЭФИРОВ ЖИРНЫХ КИСЛОТ БИОДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ (ЧАСТЬ 1)**

Анализ научных публикаций позволил обусловить набор расчетных и экспериментальных выборок, которые дают возможность сформировать базу данных о термодинамических и термохимических свойствах сложных метиловых и этиловых эфиров высших жирных кислот, химически связанных в различных комбинациях в биодизельных топливах, производимых из растительных масел. Такая база данных позволит реализовать численное моделирование рабочих процессов поршневых двигателей с самовоспламенением, работающих как на чистом биодизельном топливе, так и на биоэфирных композициях.

Ключевые слова: биотоплива, эфиры жирных кислот, растительные масла, математическое моделирование, рабочий процесс, термодинамические свойства, термохимические свойства, полином.

Введение. В общем балансе моторных топлив производство топлива из биологического сырья к 2010 году составило всего 2,2 %, показывая, однако, устойчивую тенденцию роста и по разному распределяясь по континентам. Страны ЕС отдают предпочтение производству биодизельного топлива (47 % против 5,5 % производства биоэтанола), США и Бразилия вместе взятые – 87,6 % биоэтанола против 25 % производства биодизельного топлива [1].

Вовлечение альтернативных топлив (биоэтанол, биодизельное топливо) из биосырья в сферу использования на транспорте, как в чистом виде, так и в смеси с традиционным топливом сформировало определенный перечень требований на их теплофизические свойства.

Этанол – соединение с мало углеродными молекулами, низким молекулярным весом, с известными термодинамическими, термохимическими свойствами и кинетическим механизмом сгорания. Использование этанола в качестве добавки к бензину с точки зрения моделирования сгорания и эксплуатации двигателя проблем не вызывает. Численные исследования моторных свойств биоэтанола и его смесей с бензином проводились для разного типа двигателей [5, 6] и показали, что увеличение содержания спирта в топливной смеси от 30 % и выше сопровождается необходимостью вмешательства в систему управления двигателем.

© А. М. Левтеров, О. А. Левтеров, Л. И. Левтерова, 2016