

В.О. КОНДРАТЕЦЬ, д-р техн. наук, проф., А.М. МАЦУЙ, канд. техн. наук, доц.
Кіровоградський національний технічний університет

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНОГО І ПАСИВНОГО СКАНУВАННЯ ПОВЕРХНІ ВІДКРИТИХ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ

Перевитрачання електричної енергії, куль і футеровки при подрібненні вихідної руди у кульових млинах збільшує собівартість магнетитового концентрату, що в значній мірі викликано відсутністю достатньо точних і надійних засобів вимірювання об'ємної витрати дробленого матеріалу і піскового продукту механічного спірального класифікатора. Розв'язання даної задачі складає актуальність цієї роботи. Її метою є теоретичне дослідження активного і пасивного сканування поверхні відкритих матеріальних потоків з визначенням їх особливостей і областей застосування. Сканування поверхні відкритих потоків найбільш ефективно здійснювати променем заданої довжини, закріпленим в певній точці над потоком з можливістю повороту, а вільний кінець якого взаємодіє з рухомих матеріалом. При активному скануванні вільний кінець не торкається поверхні потоку, а при пасивному – ковзає по ній. Пасивний і активний скануючі пристрої забезпечують необхідну в багатьох технологічних умовах точність вимірювання і надійність роботи. Вони можуть успішно використовуватись при контролі витрати матеріалів у збагачувальній галузі промисловості. Пасивний скануючий пристрій, як більш простий, доцільно використовувати в усіх можливих випадках. Областю застосування активних скануючих пристроїв є потоки з сильним налипанням матеріалу, малими густинами, швидкостями та абразивним зносом. Пасивні скануючі пристрої достатньо добре підходять для вимірювання піскових потоків механічних односпіральних класифікаторів.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Відсутність достатньо точних засобів вимірювання об'ємної витрати піскового продукту у пісковому жолобі механічного спірального класифікатора стримує автоматизацію розрідження пульпи у кульовому млині, що приводить до значних економічних збитків внаслідок перевитрачання електричної енергії, куль і футеровки. Розв'язання даної науково-технічної задачі сприяє удосконаленню технологічного процесу і покращенню ефективності подрібнення руди. Тому дана робота спрямована на реалізацію Державної науково-технічної програми «Ресурсозберігаючі технології нового покоління в гірничо-металургійному комплексі», затверджені Законом України «Про основи державної політики у сфері науки і науково-технічної діяльності», за напрямком 5.3.1 «Розробка технологій видобутку та збагачення сировинних матеріалів для металургійного виробництва, в тому числі з використанням відходів виробництва» та планів наукової тематики Кіровоградського національного технічного університету за темою «Комп'ютерно інтегрована система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням» (0105U008334). Оскільки дана стаття спрямована на розв'язання частини згаданої задачі, її тему слід рахувати актуальною.

Аналіз досліджень і публікацій. Розв'язанням задач автоматичного керування подрібненням руди у кульових млинах тривалий час займаються Л.М. Барський, В.О. Бунько, В.А. Воронов, І.Г. Грінман, Ю.Г. Качан, В.З. Козін, Є.В. Кочура, О.М. Марюта, В.С. Моркун, В.М. Назаренко, В.С. Процуто, А.Ю. Троп, Д. Ватсон, Л. Лінч та ін. Згадані та інші науковці зробили суттєвий внесок у розробку засобів контролю параметрів піскового потоку спірального механічного класифікатора. Найбільш вдалим можливо рахувати засіб [1], який гарантує безаварійну роботу подрібнювального циклу. Однак цей напрям тривалий час не розвивався і ніхто не досліджував особливостей активного і пасивного сканування поверхні потоку матеріалу.

Постановка завдання. Метою даної роботи є теоретичне дослідження активного і пасивного сканування поверхні відкритих матеріальних потоків з визначенням їх особливостей і областей застосування.

Викладення матеріалу та результати. Сканування поверхні відкритих потоків найбільш ефективно здійснювати променем заданої довжини [3]. В якості променя доцільно використати жорсткий відрізок твердого тіла певної довжини - скануючий елемент, закріплений з одного кінця з можливістю повороту. Другий кінець твердого тіла - вільний і взаємодіє з матеріальним потоком. Аналіз показав, що з використанням даного перетворювача можливо побудувати два типа скануючих пристроїв - активні або пасивні.

Активний скануючий пристрій здійснює безконтактне вимірювання координат h поверхні

потoku. Для цього один вільний кінець скануючого елемента жорстко закріплюють на валу, шляхом повороту якого його другий кінець утримують на певному віддаленні від матеріалу h_1 . Для організації такого сканування пристрій необхідно забезпечити системою автоматичного регулювання (рис. 1) віддалення h_1 вільного кінця від поверхні матеріалу. Регульованим об'єктом тут виступає первинний перетворювач ПП висоти h матеріалу в потоці, який містить горизонтальний вал, встановлений на кульових підшипниках, жорстко закріплений на ньому скануючий елемент з перетворювачем відстані h_1 до контрольованої поверхні. Вал, крім того, зв'язаний із знижувальним редуктором P реверсивного двигуна РД та перетворювачем кута ПК, забезпеченим вимірювальним приладом ВП. Вихідною величиною тут є кут повороту вала, а регульованою - відстань h_1 до поверхні матеріалу.

Безконтактний датчик відстані ДВ (рис. 1) шарнірно встановлено на кінці скануючого елемента. Під дією власної ваги він завжди знаходиться у вертикальному положенні. Датчик відстані ДВ (наприклад емнісного типу) своїм полем взаємодіє з матеріалом. Його вихідний сигнал змінюється при наближенні матеріалу. Якщо задавач відстані ЗВ буде мати рівень сигналу, що відповідає певній відстані матеріалу до крайки перетворювача, то можливо автоматично підтримувати цей параметр у будь-яких технологічних ситуаціях. Регульована відстань h_1 включає висоту самого перетворювача разом з висотою його робочого поля.

Сигнал датчика відстані ДВ (рис. 1) на елементі порівняння ЕП порівнюється з сигналом задавача відстані ЗВ. Якщо ці сигнали однакові за амплітудою і полярністю, то схема знаходиться в усталеному режимі. Це означає, що відстань від крайки датчика відстані до матеріалу відповідає заданому значенню. У випадку збільшення висоти матеріалу сигнал ДВ зміниться, що приведе до формування керуючого діяння в системі і приведення дійсного значення відстані h_1 до заданого задавачем ЗВ через спрацювання підсилювача П, фазочутливого підсилювача ФП, реверсивного двигуна РД та редуктора Р.

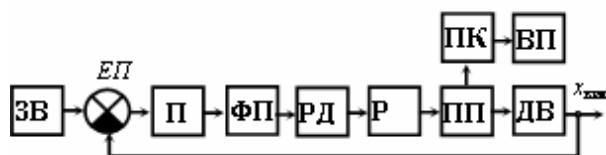


Рис. 1. Функціональна схема системи автоматичного регулювання положення датчика відстані над потоком

Точність вимірювання висоти матеріалу в потоці визначається величиною похибки датчика відстані, тобто, точністю стабілізації параметра h_1 .

На точність стабілізації параметра h_1 впливають як сама похибка вимірювання відстані до матеріалу, так і статичні та динамічні властивості системи автоматичного регулювання. В усталеному режимі роботи високу точність вимірювання кута повороту вала можливо забезпечити при відсутності статичної помилки системи. Для чіткого відслідковування рельєфу поверхні потоку система автоматичного регулювання повинна володіти високою швидкістю. Для цього до складу системи необхідно ввести коректуючий пристрій, а розробляти її необхідно як оптимальну за швидкістю. Оскільки помилки, що при цьому виникають, є незалежними, результуючу середньоквадратичну помилку вимірювання висоти матеріалу в потоці можливо визначити за формулою

$$\delta = \sqrt{\delta_{ДВ}^2 + \delta_{СР}^2 + \delta_{ПК}^2}, \quad (1)$$

де $\delta_{ДВ}$, $\delta_{СР}$, $\delta_{ПК}$ - відповідно середні квадратичні відхилення сигналів датчика відстані, системи автоматичного регулювання, перетворювача кута від приписаного значення.

Пасивний скануючий пристрій являє собою закріплений на валу важіль - скануючий елемент з робочим елементом на вільному кінці, який ковзає по поверхні матеріалу. Закріплений кінець скануючого елемента відтворює кут повороту, який однозначно зв'язаний з рівнем матеріалу залежністю

$$\alpha_{П} = 2 \arcsin \sqrt{\frac{h}{2l}}, \quad (2)$$

де h - товщина шару матеріального потоку; l - довжина скануючого елемента.

Пасивний скануючий пристрій (рис. 2) має перетворювач кута ПК і вимірювальний прилад ВП. Його точність в основному визначається лише похибкою ланцюга ПК-ВП та зносом крайки робочого елемента.

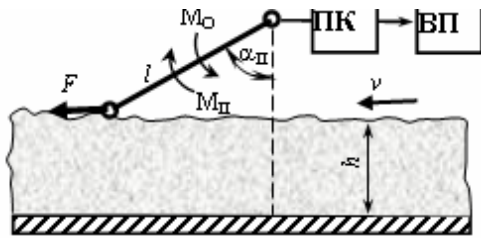


Рис. 2. Функціональна схема пасивного скануючого пристрою поверхні матеріального потоку

Як видно з (2), кут $\alpha_{\text{П}}$ нелінійно залежить від висоти матеріалу h в потоці.

Аналіз показав, що кут повороту вала активного скануючого пристрою визначається залежністю

$$\alpha_{\text{П}} = 2 \arcsin \sqrt{\frac{h + h_1}{2l}}, \quad (3)$$

де h_1 - відстань від вільного кінця скануючого елемента до поверхні матеріалу.

Як видно з (3), при $h_1=0$ отримуємо залежність (2), що відповідає пасивному скануючому пристрою. На рис. 3 показані залежності кута повороту вала первинного перетворювача від товщини матеріалу в потоці при різних значеннях відстані h_1 . При $h_1=0$ отримуємо характеристику, що відповідає пасивному скануючому пристрою (рис. 3а). З рис. 3б,г видно, що статичні характеристики активного скануючого пристрою однотипні.

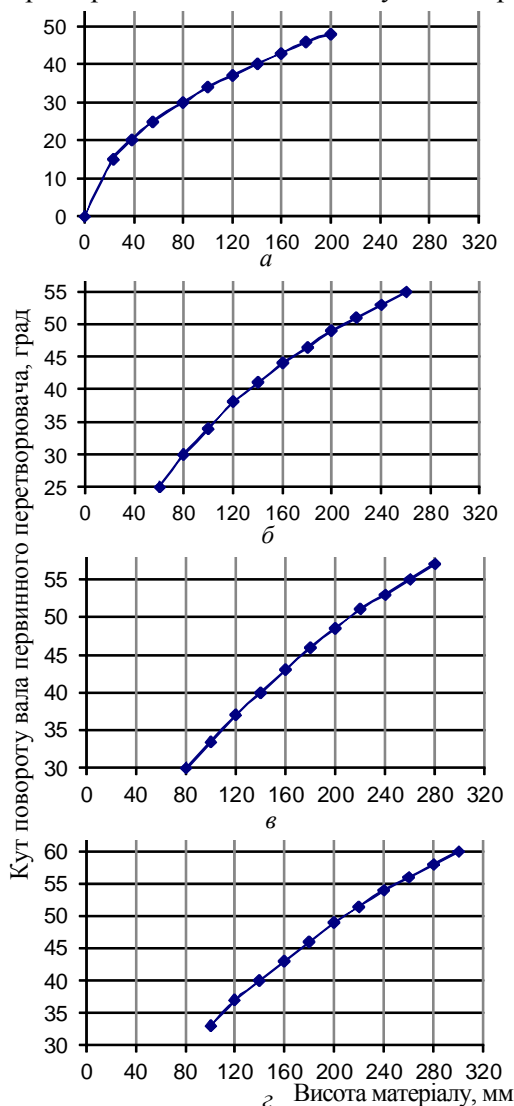


Рис. 3. Залежність кута повороту вала первинного перетворювача від товщини матеріалу в горизонтальному потоці при різних відстанях h_1 кінця скануючого елемента від поверхні вимірюваного середовища: а,б,г,з – відповідно при $h = 0,60, 80, 100$ мм

Більш детальний аналіз показує, що всі вони сумісні між собою, тобто, є продовженням одна одної, займаючи лише різні діапазони зміни товщини матеріалу і кутів повороту. З статичних характеристик (рис. 3) видно, що у межах розглянутих змін h_1 з ростом даного показника не лінійність залежностей дещо зменшується.

На відміну від активних пасивні скануючі пристрої не мають привода і їх вільний кінець вільно ковзає по поверхні потоку. Якщо це сипкий матеріал, то робочий елемент не занурюється в нього і вимірювання здійснюється достатньо точно.

У випадку рідин така взаємодія ускладнюється. Розглянемо взаємодію рідкого потоку і робочого елемента у вихідному положенні, коли робочий елемент розташований перпендикулярно потоку і зафіксовано. Знайдемо розподіл тиску і сили тиску рідини на робочий елемент по його ширині.

Швидкість частинок рідини, що знаходяться на поверхні потоку в точці А (рис. 4) на відстані x від середини ширини робочого елемента дорівнює [2]

$$W = C \cdot \ln \frac{b+x}{b-x}, \quad (4)$$

де C - стала.

Віднесемо зміни тиску в різних точках по ширині робочого елемента до швидкісного напору в нескінченності і запишемо

$$\frac{\rho v^2}{2} = \frac{\rho \pi^2 C^2}{2}, \quad (5)$$

де ρ - густини рідини; v - швидкість потоку.

Аналізуючи розподіл тисків вздовж ширини робочого елемента, які діють з двох його боків, встановлено, що їх різниця стала по ширині робочого елемента і дорівнює перепаду в точці А, тобто $P_A=2$ (рис. 4).

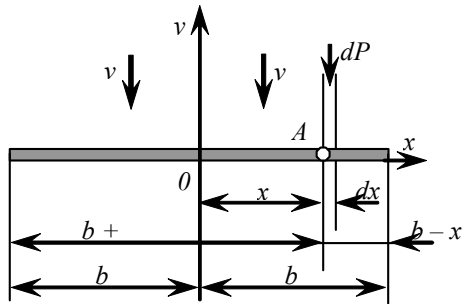


Рис. 4. Взаємодія потоку рідини з робочим елементом скануючого пристрою

Повна сила, що діє на робочий елемент з боку потоку, дорівнює

$$F = \rho v^2 \cdot \Delta h B, \quad (6)$$

де $B=2b$ - ширина робочого елемента.

Під дією сили F потоку (див. рис. 2) буде розвиватись момент повороту, який дорівнює

$$M_n = (l - h) \cdot F. \quad (7)$$

Моменту повороту M_n протидіє момент опору M_o , який створюється масою скануючого елемента та масою робочого елемента. Він буде дорівнювати

$$M_o = \frac{l_r}{2} (m_{ce} + 2m_{pe}) g, \quad (8)$$

де l_r - проекція скануючого елемента на горизонтальну вісь; m_{ce} , m_{pe} - відповідно маси скануючого елемента та робочого елемента; g - прискорення земного тяжіння.

Долаючи момент опору M_o , M_n повертає скануючий елемент. У рівновазі $M_n = M_o$, що дозволяє визначити величину заглиблення Δh робочого елемента в потік. Вона буде дорівнювати

$$\Delta h = \frac{(m_{ce} + 2m_{pe}) g}{2\rho \cdot B \cdot v^2} \cdot l \cdot \frac{\sqrt{\frac{2h}{l} - \frac{h^2}{l^2}}}{l - h}. \quad (9)$$

Залежність (9) містить конструктивні, фізичні та, можливо, експлуатаційні сталі. Змінна висота потоку h , довжина скануючого елемента l впливають на значення занурення Δh . При роботі Δh бажано мати незначним за величиною. Тому необхідно приймати найменші маси m_{ce} , m_{pe} і, по можливості, найбільш широкий робочий елемент B . Змінна частина виразу (9), що містить h і l , також повинна мати найменше значення.

Як показує аналіз, змінна частина виразу (9) при певних висотах матеріалу h залежить від l . Тому вона може слугувати критерієм оптимальності, якому необхідно надати найменше значення. Критерій оптимальності буде дорівнювати

$$J = l \frac{\sqrt{(2h/l) - (h^2/l^2)}}{l - h} \rightarrow \min. \quad (10)$$

За умовою задачі на величину l необхідно накласти обмеження

$$l_{\text{доп}} \geq l > h, \quad (11)$$

де $l_{\text{доп}}$ - визначається можливими габаритами і можливістю обтікання хвилеподібних поверхонь матеріалу.

У табл. 1 наведено значення критерію оптимальності, розраховані за виразом (10). З даних табл. 1 видно, що критерій оптимальності зменшується при зростанні довжини скануючого елемента при будь-яких значеннях висоти потоку.

Збільшення висоти потоку приводить до значного зростання критерію оптимальності. Критерій оптимальності (10) не має мінімуму, тому йому необхідно надати найменше значення, яке, крім того, буде визначатись осередненою висотою потоку.

Якщо найбільш імовірним значенням висоти потоку буде 100 мм, то за даними табл. 1 можна встановити рівень критерію оптимальності.

Найкраще значення критерію оптимальності може бути в області, наближеній до 0,6634, а довжини скануючого елемента - в межах певних змін відносно значення 600 мм.

Ці значення будуть найкращими тому, що критерій оптимальності з ростом довжини скануючого елемента спочатку стрімко зменшується, а потім зменшення відбувається повільніше.

При зростанні довжини скануючого елемента з 0,4 до 0,6 м критерій оптимальності зменшується на 0,22, а з 0,6 до граничних 0,8, всього на 0,11 і в два рази менше, ніж в попередньому випадку. Тому довжину скануючого елемента доцільно приймати десь на рівні 600 мм.

Залежність критерію оптимальності від довжини скануючого елемента

Висота потоку, м	Довжина скануючого елемента, м			
	0,2	0,4	0,6	0,8
0,05	0,8819	0,5533	0,4030	0,3712
0,10	1,7320	0,8819	0,6634	0,5533
0,15	2,6458	1,2490	0,8819	0,7175
0,20	-	1,7320	1,1180	0,8819

Оптимізація довжини скануючого елемента забезпечує найкращі параметри пристрою, однак не гарантує високої точності вимірювання координат поверхні, оскільки при визначенні l параметр Δh зі зміною висоти потоку може коливатись у значних межах. Промодельюємо даний процес з використанням залежності (9) на пісковому потоці спірального механічного класифікатора, приймаючи $l=0,6$ м, $\rho=2200$ кг/м³, $B=0,06$ м, $m_{ce}=0,05$ кг, $m_{pe}=0,05$ кг.

Результати моделювання зведені до табл. 2. З даних табл. 2 слідує, що заглиблення Δh робочого елемента пасивного скануючого пристрою у пісковий потік порівняно невелике. Чим більша швидкість руху матеріалу, тим воно менше. З ростом висоти потоку воно значно збільшується. До похибки вимірювання приводить не абсолютне значення Δh , а його зміни в процесі роботи.

Отже, на точність вимірювання координат поверхні потоку будуть впливати зміни висоти і швидкості руху матеріалу.

Наприклад, піски односпірального механічного класифікатора рухаються хвилеподібно, змінюючи висоту матеріалу від деякого найменшого до найбільшого значення. Швидкість руху матеріалу також при характерних циркулюючих навантаженнях змінюється порівняно в незначних межах. При значних густинах епіюра швидкостей також вирівнюється. Такий матеріальний потік є ідеальним для використання пасивного скануючого пристрою. Потоки з сипкого матеріалу таку похибку не породжують.

Аналіз показує, що рух пульпи в основному здійснюється з швидкостями 1,5-2,5 м/с. Тому швидкість 1 м/с можливо рахувати граничною, де похибки від зміни висоти матеріалу будуть найвищими. З даних табл. 2 слідує, що при $v=1$ м/с заглиблення робочого елемента пасивного скануючого пристрою у пісковий потік складає відповідно висоти потоку 4,5; 3,7; 3,28; 3,12 % у межах їх зміни від 0,05 до 0,20 м. Це значні відхилення.

Таблиця 2

Заглиблення робочого елемента пасивного скануючого пристрою у пісковий потік, мм

Висота потоку, м	Швидкість потоку матеріалу, м/с			
	1,0	1,5	2,0	2,5
0,05	2,25	1,50	1,12	0,90
0,10	3,70	2,46	1,85	1,48
0,15	4,92	3,28	2,46	1,97

Однак, якщо налагодження пристрою здійснити з компенсацією заглиблення на 3,7 мм при $h=0,1$ м, то відхилення Δh відповідно складуть - 1,45; 0; 1,22 і 2,53 мм, що відповідає відносним похибкам - 2,90 %, 0 %, 0,81 % і 1,26 %. Враховуючи, що значення висоти матеріалу 0,05 м малоімовірно, такі похибки допустимі при вимірюванні координат поверхні потоку.

При більших значеннях швидкостей похибки будуть зменшуватись і все ж вони залишаються значними при висотах матеріалу, що перевищують 150 мм.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Отже, пасивний і активний скануючі пристрої забезпечують необхідну в багатьох технологічних умовах точність вимірювання і надійність роботи. Вони можуть успішно використовуватись при контролі витрати матеріалів у збагачувальній галузі промисловості.

Пасивний скануючий пристрій, як більш простий, доцільно використовувати в усіх можливих випадках.

Областю застосування активних скануючих пристроїв є потоки з сильним налипанням матеріалу, малими густинами, швидкостями та абразивним зносом.

Пасивні скануючі пристрої достатньо добре підходять для вимірювання піскових потоків односпіральних механічних класифікаторів.

Потоки двоспіральних механічних класифікаторів з достатньо високою точністю виміряти практично не можливо в наслідок великої висоти, її пульсацій в широкому діапазоні, зміни в широких межах витрати, швидкості та густини матеріалу.

Перспективою подальших досліджень є забезпечення лінійності статичних характеристик пасивних і активних скануючих пристроїв.

Список літератури

1. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов в АСУ ТП обогатительного производства / [Моркун В. С., Потапов В. Н., Моркун Н. В., Подгородецкий Н. С.]. – Кривой Рог : Изд. центр КТУ, 2007. – 283 с.
2. Моркун В. С. Ультразвуковые поверхностные волны Лэмба и Лява в измерительных системах / В.С. Моркун, О.В. Поркуян - Кривий Ріг: Изд. центр КТУ, 2006. – 261 с.
3. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології / Купін А.І.– Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008. – 204 с.
4. Назаренко М.В. Прогнозуюче адаптивне керування стохастичною системою для забезпечення раціональних техніко-економічних показників на прикладі залізорудного гірничо-збагачувального комбінату / Назаренко М.В. – Кривий Ріг: Діоніс (ФОП Чернявський Д.О.). – 2010. – 309 с.
5. Назаренко М.В. Теоретичні засади та принципи побудови моделей динамічних процесів та їх регуляторів / Назаренко М.В. – Кривий Ріг: Діоніс (ФОП Чернявський Д.О.). – 2010. – 204 с.
6. Азарян А.А. Автоматизация первой стадии измельчения, классификации и магнитной сепарации – реальный путь повышения эффективности обогащения железных руд / А.А. Азарян, Ю.Ю. Кривенко, В.Г. Кучер // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць.- 2014.- Вип. 36.- С. 276-280.
7. Щокін В. П. Інтелектуальні системи керування: аналітичний синтез та методи дослідження / В.П. Щокін. – Кривий Ріг: Діоніс (ФОП Чернявський Д.О.), 2010. – 264 с.
8. Измельчение. Энергетика и технология / [Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. и др.]. – М.: Изд. дом “Руда и Металлы”, 2007.– 296 с.
9. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых / [Морозов В.В., Топчаев В.П., Улитенко К.Я. и др.].– М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2013.– 512 с.
10. Луткин Н.И. Приборы для контроля технологического процесса в потоке / Н.И. Луткин, К.К. Морар.– М.: Колос, 1978.– 160 с.
11. Гудима В.И. Основы автоматизации обогатительных фабрик / Гудима В.И.– М.: Недра, 1979.– 310 с.
12. Троп А.Е. Автоматизация обогатительных фабрик / А.Е. Троп, В.З. Козин.– М.: Недра, 1974.– 225 с.
13. Goldberg A.S., Boothroyd R.G. Measurements in flowing gas-solids suspensions.– Part I. Brit. Chemical Engineering, 14, 1969, 12, 1705-1708.
14. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ / Кремлевский П.П. - СПб.: Политехника, 2004.– 416 с.
15. А.с. 399252 СССР, МКИ В 03 В 13/04, В 02 С 25/00. Устройство для измерения песковой нагрузки в замкнутом цикле измельчения / С.А. Волотковский, А.К. Елисеев, А.Н. Марюта (СССР). - № 1662502/29-33; заявл. 25.05.71; опубл. 03.10.73, Бюл. № 32.
16. А.с. 329905 СССР, МКИ В 03 С 5/00. Способ непрерывного измерения циркулирующей нагрузки / Т.И. Гуленко, В.А. Кондратец (СССР). – № 1352391/29-33; заявл. 28.07.69; опубл. 24.02.72, Бюл. № 8.
17. А.с. 388790 СССР, МКИ В 03 В 11/00. Устройство для автоматического контроля загрузки и стабилизации разжижения пульпы в мельнице / Ф.Н. Дегтярев, А.А. Мерзляков, В.А. Кондратец, В.И. Новохатько, Н.И. Кучма, Т.И. Гуленко (СССР). – № 1420849/29-33; заявл. 30.03.70; опубл. 05.07.73, Бюл. № 29.
18. А.с. 570398 СССР, МКИ В 03 В 13/04. Устройство для измерения циркулирующей нагрузки / Ф.Н. Дегтярев, 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.
19. Кондратец В.О. Теоретичне дослідження сканування поверхні відкритих матеріальних потоків променями незмінної довжини / В.О. Кондратец // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць.- 2013.- Вип. 35.- С. 174-178.
20. Милович А.Я. Теория динамического взаимодействия тел и жидкости / Милович А.Я. — М: Госиздат лит. по строит. и archit., 1955. – 310 с.

Рукопис подано до редакції 14.06.15