

УДК 622.7

В.И. КРИВОЩЕКОВ, канд. техн. наук,

А.А. МЕДВЕДЕВА

(Украина, Днепр, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет")

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ ГИДРОЦИКЛОНОВ В УСЛОВИЯХ ИРШАНСКОГО ГОКа

Предпосылки эффективной работы гидроциклона с пристенной перемешкой. Цилиндроконические гидроциклоны (ГЦ) широко применяют в рудоугле-перерабатывающей, химической и других отраслях промышленности [1].

С углом конусности 20 град чаще ГЦ используют как классифицирующий аппарат, однако в ряде случаев для обеспечения необходимого технологического эффекта изменяют конструкцию конической части. Так, в зависимости от требуемых показателей разделения минеральных зерен фирма "Кребс Энджиниринг" поставляет гидроциклоны с коническими секциями разных углов.

С увеличением угла конусности (более 20 град) ГЦ гидравлическое сопротивление возрастает и изменяется соотношение составляющих скорости движения жидкости. Вследствие этого, при прочих равных условиях, уменьшается объемная производительность и повышается эффективность обогащения. Так, в гидроциклоне с углом конусности 45-70 град при одностадийной сепарации угольного шлама 0,5-3 мм в водной среде с эффективностью обогащения 60 и степенью обессеривания 20...25% получают концентрат зольностью менее 7%. Эффективнее обогащается в водной среде класс 0-0,5 мм [2].

На плотных и грубозернистых суспензиях с необходимостью получения малого выхода песков гидроциклоны с углом конусности 20 град и менее применяться не могут, поскольку при установке песковой насадки малого диаметра (что обязательно) она забивается.

В таких случаях предпочтительно применять коротконусные гидроциклоны. К последним относят компаундный гидроциклон "Висман-Трикон" фирмы "Мак-Нелли" для обогащения угля в водной среде, отличающийся конструкцией конической части. Конус, примыкающий к цилиндрической части, имеет угол 135 град, а два других – 75 и 20 град. Назначение секции с углом 75 град – сепарация промпродуктовой фракции, верхней – отделение легкой фракции, нижней – разделение зерен по крупности.

Исследования по разделению угольного шлама [3] в центробежном аппарате диаметром 150 мм, корпус которого выполнен в виде примыкающих к тору двух псевдосфер со спиральными патрубками для разгрузки грубого слива, показали, что его максимальная производительность по исходному продукту не превышает 7 м³/ч при давлении на входе 196 кПа. Для ГЦ-150 она составляет 12-40 м³/ч при давлении 100 кПа [4], что свидетельствует о его преимуществе перед центробежным аппаратом.

Гидроциклоны с расширяющее-суживающим конусом (ГЦРСК) и шаровой зоной разделения (ГЦШ) по сравнению с ГЦ отличаются повышенной технологической эффективностью за счет изменения формы рабочей камеры. Расширение потока ниже цилиндрической части и его последующее сужение приводит к созданию зоны (кольцевого вихря), разграничивающей слив от внешнего потока с повышенной концентрацией частиц и тем самым обеспечивающей снижение d_{cp} и E_p . Так, при давлении на входе 98 кПа в ГЦШ и ГЦРСК d_{cp} в 1,76 и 1,42, а E_p в 2,09 и 1,77 раза меньше, чем в ГЦ [5].

При практической близости технологических показателей работы ГЦШ и ГЦРСК первый более сложен по конструкции и изготовлению, поэтому перспективность второго в качестве объекта исследования очевидна.

Успех совершенствования гидроциклонирования зависит от степени решения технической проблемы, сущность которой заключается в создании технико-технологических условий повышения эффективности сепарации и производительности гидроциклона. Развитием этого направления является разработка нового формирования структуры послонного потока суспензии и ее перечистка в конической части гидроциклона [7, 8].

Гидроциклон с пристенной перечисткой (ГСП) (рис. 1) включает корпус 1, выполненный из цилиндрической части 2 и установленной под ней биконической части из двух соединенных большими основаниями усеченных конусов 3 и 4. Тангенциально цилиндрической части корпуса расположен питающий патрубок 5, соосно корпусу 1 установлены сливной патрубок 6 и песковая насадка 7. В верхней части корпуса 1 находится крышка 8. На внутренней поверхности усеченных конусов 3 и 4 попарно диаметрально установлены направляющие пластины 9. Кромки 10 направляющих пластин 9 размещены по конической поверхности, направленной вершиной в сторону песковой насадки 7.

Гидроциклон работает так. Исходная суспензия через тангенциально установленный питающий патрубок 5 под давлением подается в цилиндрическую часть 2 корпуса 1 гидроциклона и приобретает в нем вращательное движение по винтовой линии сверху вниз к песковой насадке 7.

Под действием центробежной силы и благодаря различию скоростей движения разделяемых минеральных частиц относительно жидкой среды происходит их перегруппирование по крупности (или плотности) таким образом, что крупность (или плотность) зерен уменьшается в направлении к оси гидроциклона.

Наличие расширяющее – суживающей рабочей зоны гидроциклона улучшает условия последующего разделения минеральных частиц и расслоения вращающегося потока суспензии. Этому способствует то, что в верхнем усеченном конусе 3 радиальная составляющая скорости потока направлена от оси гидроциклона, благодаря чему ограничена возможность попадания крупных частиц во внутренний приосевой поток, который через сливной патрубок 6 выводится из гидроциклона, образуя слив, содержащий только мелкие (легкие) частицы.

Гравітаційна сепарація

При этом перемещение преимущественно крупных (тяжелых) частиц к периферийной стенке конуса 3 гидроциклона обеспечивается расширением вращающегося потока в поле центробежных сил. В нижнем усеченном конусе 4 радиальная составляющая скорости потока направлена к оси гидроциклона и в зоне изменения ее направления по границе сопряжения конусов происходит плавный переход по концентрации твердой фазы в суспензии.

Плавный переход по концентрации (без резкого скачка) обусловлен и обеспечен наличием направляющих пластин 9, которые в зоне сопряжения оснований усеченных конусов 3 и 4 устраняют циркуляционный поток суспензии в виде тора, разбивая его на отдельные нисходящие потоки. Последние имеют прямолинейные канальные участки, где их поперечные циркуляции и пульсационная составляющая скорости жидкой фазы суспензии плавно затухают.

В результате возникает новое формирование структуры потока суспензии в конической части гидроциклона: основной вращающийся поток с периферийной границей на внутренних кромках 10 направляющих пластин 9; нисходящие пристенные индивидуально стабилизированные потоки, разделенные пластинами 9 и по оси гидроциклона, как и в обычных гидроциклонах, внутренний приосевой поток с так называемым "воздушным столбом".

Каждый из сформированных потоков суспензии в данном гидроциклоне имеет определенное функциональное назначение.

Перечистка пристенного слоя суспензии осуществляется при непосредственном взаимодействии основного вращающегося потока суспензии с внутренними кромками 10 пластин 9. По мере продвижения винтовой линией в направлении песковой насадки 7 периферийный слой основного вращающегося потока срезается пластинами 9, а поскольку они выполнены в виде образующих конуса, направленного вершиной вниз, то срезывание потока осуществляется полойно и последовательно.

Срываясь с внутренней кромки 10 пластины 9, основной вращающийся поток образует вихревую зону 11, в которой нерасслоившийся пристенный слой суспензии подвергается перечистке путем механического воздействия турбулентных струй (вихрей) и пульсаций жидкой фазы. Благодаря тому, что крупные (тяжелые) частицы меньше подвержены влиянию этих струй и пульсации за счет своей инерционной массы и направленного воздействия на них центробежных сил, они попадают в пространство между пластинами 9 и прижимаются к внутренней поверхности конусов 3 и 4, транспортируясь по ней к песковой насадке 7.

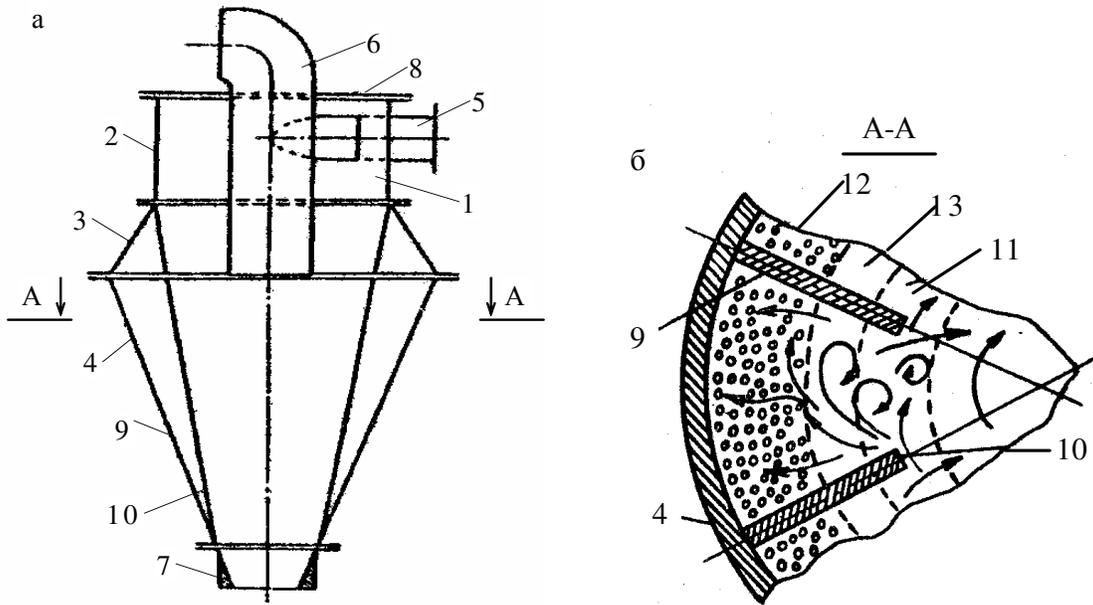


Рис. 1. Принципіальна схема гідроциклона (а) і структура потоку суспензії (б) в його конічеської часті

Мелкие (легкие) частицы из нерасслоившегося пристенного слоя суспензии выносятся турбулентными струями (вихрями) и пульсациями жидкой фазы во вращающийся основной поток суспензии и поскольку радиальная составляющая скорости потока в нижнем конусе 4 направлена к оси гидроциклона, то мелкие частицы перемещаются во внутренний приосевой поток и через сливной патрубок 6 выводятся из гидроциклона.

Размещение заборного конца сливного патрубка 6 в зоне соединения конусов 3 и 4 предпочтительно, так как в верхнем усеченном конусе 3 радиальная составляющая скорости потока направлена от оси, а в нижнем конусе 4 к оси гидроциклона, что ограничивает перемещение крупных частиц в этой зоне в сторону заборного конца сливного патрубка 6.

Нисходящие пристенные индивидуально стабилизированные потоки, изолированные друг от друга пластинами 9, по мере продвижения в прямооточной зоне межпластиночных каналов вниз к песковой насадке 7 уплотняются до максимальной концентрации твердой фазы. Это происходит за счет постепенного уменьшения расстояния между пластинами 9 и усиления воздействия центробежных сил основного вращающегося потока. "Выжимание" жидкой фазы сопровождается вытеснением и выносом легких (мелких) частиц из концентрированного слоя 12 суспензии межпластиночных каналов через разрыхленный слой 13 в вихревую зону 11, из которой они вымываются турбулентными струями (вихрями) и пульсациями жидкой фазы во вращающийся основной поток и далее перемещаются в радиальном направлении к приосевому потоку.

Между вихревой зоной 11 потока и концентрированным слоем 12 суспензии в межпластиночных каналах осуществляется разрыхление минеральных

Гравітаційна сепарація

частиц (за счет разности скоростей суспензии по высоте в канале и концентрации в ней твердой фазы), способствующее их сепарации (по крупности и плотности).

В направлении к песковой насадке 7 высота пластин 9 плавно уменьшается, обеспечивая полное и плавное соединение уплотненных концентрированных пристенных потоков с вращающимся потоком. При этом толщина вихревой зоны 11 и слоя разрыхления 13 постепенно уменьшается с увеличением толщины концентрированного слоя 12 суспензии, образуя естественный "утяжеленный слой" (постель) из частиц промежуточной плотности и сростков. Разрыхленность, реологические и другие свойства "утяжеленного слоя", при прочих равных условиях, зависят от конструктивных и гидродинамических особенностей зоны разделения и определяют технологический режим сепарации минеральных частиц.

Мелкие (легкие) частицы, не способные преодолеть сопротивление радиального потока суспензии, уносятся этим потоком во внутренний приосевой восходящий поток и выводятся из гидроциклона через сливной патрубок 6.

Оставшаяся часть суспензии, содержащая преимущественно крупные (тяжелые) частицы с максимальной их концентрацией в суспензии, перемещается к вершине нижнего конуса 4 и разгружается через насадку 7, образуя песковый продукт (пески).

Исследования и испытания гидроциклона с углом конусности 20 град, оснащенного направляющими пластинами в биконической части, дали положительный результат. В связи с этим выполнены изыскания рациональных конструктивных и гидродинамических параметров зоны разделения по обеспечению максимального технологического эффекта.

Сравнительные испытания гидроциклонов ГЦ-1000 (без перечистки пристенного слоя суспензии в конической части гидроциклона) и ГЦП-1000 (с перечисткой пристенного слоя суспензии в конической части гидроциклона) выполнены в операции контрольного обесшламливания, где задействован один стандартный гидроциклон ГЦ-1000 в условиях обогатительной фабрики карьера №8 Иршанского ГОКа.

Методикой испытаний предусматривалось контрольное опробование работы гидроциклона ГЦ-1000 с последующей установкой в его конической части попарно диаметрально направляющих металлических пластин (1 вариант) и цилиндрических прутьев – арматуры (2 вариант), соединенных обручем – тором и сваркой в виде усеченного каркаса.

Обобщенные результаты сравнительных испытаний гидроциклонов приведены в табл. 1 и 2, а на рис. 2 и 3 – сепарационная характеристика и зависимость производительности от давления суспензии на входе гидроциклона без перечистки (ГЦ-1000) и с пристенной перечисткой (ГЦП-1000).

По данным табл. 1 и 2 эффективность классификации по крупности менее 0,1 и 0,14 мм определялась по формуле Ханкока-Луйкена-Дина:

$$\eta = \frac{(\alpha - \vartheta) \cdot (\beta - \alpha)}{\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot (\beta - \vartheta)} \cdot 100 \%,$$

где α, β, ϑ – содержание расчетного класса крупностью менее 0,1 и 0,14 мм соответственно в исходном продукте, сливе, песках гидроциклона, в дол. ед.

Вычисленная по указанной формуле эффективность разделения водоминеральной суспензии в ГЦП-1000 и ГЦ-1000 соответственно составляет:

$$\eta_{-0,1} = \frac{(0,8582 - 0,2684) \cdot (0,9144 - 0,8582)}{0,8582 \cdot (1 - 0,8582) \cdot (0,9144 - 0,2684)} \cdot 100 = 42,16 \%;$$

$$\eta_{-0,14} = \frac{(0,8582 - 0,2888) \cdot (0,9441 - 0,8582)}{0,8582 \cdot (1 - 0,8582) \cdot (0,9441 - 0,2888)} \cdot 100 = 61,34 \%;$$

$$\eta_{-0,1} = \frac{(0,8582 - 0,4806) \cdot (0,8933 - 0,8582)}{0,8582 \cdot (1 - 0,8582) \cdot (0,8933 - 0,4806)} \cdot 100 = 26,39 \%;$$

$$\eta_{-0,14} = \frac{(0,8874 - 0,5178) \cdot (0,9214 - 0,8874)}{0,8874 \cdot (1 - 0,8874) \cdot (0,9214 - 0,5178)} \cdot 100 = 31,16 \%.$$

Преимущества внедренного гидроциклона ГЦП-1000 [7]. Гидроциклон ГЦП-1000 применен вместо цилиндрикоконического гидроциклона ГЦ-1000 в операции контрольного обесшламливания и подготовки водоминеральной суспензии по крупности для последующих технологических операций. Это позволило уменьшить содержание минеральных частиц крупностью менее 0,1 мм в песках на 21,22% (с 48,06 до 26,84%) и повысить их содержание в сливе гидроциклона на 2,11% (с 89,33 до 91,44%), а содержание частиц крупностью более 0,28 мм в песках увеличить на 25,71% (с 34,90 до 60,61%). Такое распределение минеральных частиц по крупности обеспечило снижение потерь ильменита в сливе гидроциклона ГЦП-1000 на 0,76% (с 1,55 до 0,79%) по сравнению со сливом ГЦ-1000 при увеличении выхода песков ГЦП-1000 на 0,2% (с 5,3 до 5,8%).

Форма внедрения. Способ и устройство гидроциклонирования с перемешиванием пристенного слоя водоминеральной суспензии.

Расчетная (ожидаемая) экономическая эффективность 2000 тыс. грн/год получена за счет сокращения потерь ильменита с отходами производства и дополнительного выхода до 0,15% товарной продукции по карьере.

Основные технико-экономические показатели по предприятию (до и после внедрения). Снижение потерь ильменита на 0,7...0,8% при повышении производительности гидроциклона с 301,8 до 336,9 м³/ч и сепарационной эффективности до 61,34% (по Ханкоку).

Научно-технический эффект. Внедрение и положительные результаты работы гидроциклона ГЦП-1000 позволяют заменить стандартные цилиндрикоконические гидроциклоны на гидроциклоны с перемешиванием пристенного слоя во
Збагачення корисних копалин, 2017. – Вип. 65(106)

Гравітаційна сепарація

доминеральной суспензии с целью снижения потерь ильменита с отходами производства за счет изменения структуры потока суспензии при гидроциклонировании.

Таблица 1

Результаты работы ГЦ-1000 без перечистки пристенного слоя суспензии.

Давление суспензии на входе гидроциклона $P = 98$ кПа

Класс крупности, мм	Средняя крупность класса, мм	Исходный продукт γ , %	Слив			Пески		
			выход продукта, %	выход к исходному, %	извлечение, %	выход продукта, %	выход к исходному, %	извлечение, %
+1,0	1,25	–	–	–	–	–	–	–
0,56-1,0	0,78	2,68	0,78	0,714	26,64	23,13	1,966	73,36
0,28-0,56	0,42	2,72	1,88	1,719	63,20	11,77	1,001	36,80
0,14-0,28	0,21	5,89	5,20	4,758	80,78	13,32	1,132	19,22
0,1-0,14	0,12	2,89	2,81	2,574	89,10	3,72	0,316	10,90
0,05-0,1	0,75	12,63	12,88	11,785	93,31	9,94	0,845	6,69
-0,05	0,025	73,19	76,45	69,950	95,57	38,12	3,240	4,43
Итого	–	100,00	100,00	91,50	–	100,00	8,50	–
γ , %	100,00		91,30			8,50		
W , м ³ /ч	301,79		218,23			83,56		
β , %	1,92		1,55			5,9		

где γ – выход продукта, %; W – производительность по суспензии (её расход), м³/ч; β – содержание ильменита в продукте, %; η – эффективность классификации по Ханкоу – Луйкену – Дину.

Таблица 2

Результаты работы ГЦП-1000 с перечисткой пристенного слоя суспензии.

Давление суспензии на входе гидроциклона $P = 98$ кПа

Класс крупности, мм	Средняя крупность класса, мм	Исходный продукт γ , %	Слив			Пески		
			выход продукта, %	выход к исходному, %	извлечение, %	выход продукта, %	выход к исходному, %	извлечение, %
+1,0	1,25	–	–	–	–	–	–	–
0,56-1,0	0,78	2,68	0,04	0,036	1,34	30,39	2,644	98,66
0,28-0,56	0,42	2,72	0,10	0,091	3,34	30,22	2,629	96,66
0,14-0,28	0,21	5,89	5,45	4,976	84,48	10,51	0,914	15,52
0,1-0,14	0,12	2,89	2,97	2,712	93,84	2,04	0,178	6,16
0,05-0,1	0,75	12,63	13,24	12,088	95,71	6,23	0,542	4,29
-0,05	0,025	73,19	78,20	71,397	97,55	20,61	1,793	2,45
Итого	–	100,00	100,00	91,30	–	100,00	8,70	–
γ , %	100,00		91,30			8,70		
W , м ³ /ч	336,95		245,61			91,34		
β , %	1,92		0,79			13,79		

Показатель	ГЦ-1000	ГЦП-1000
Диаметр граничного зерна разделения, d_{gp} , мм	0,54	0,29
Среднее вероятное отклонение E_{pm} , мм	0,257	0,046
Коэффициент погрешности разделения I	0,476	0,158

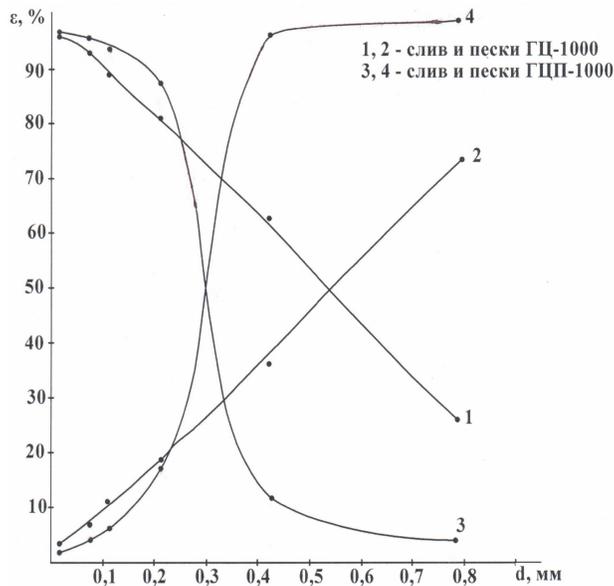


Рис. 2. Сепарационная характеристика гидроциклона без перечистки ГЦ-1000 и с пристенной перечисткой ГЦП-1000

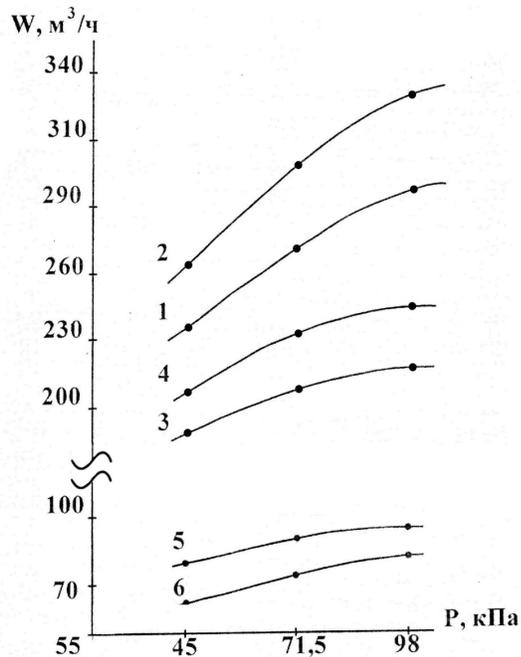


Рис. 3. Зависимость производительности от давления суспензии на вводе гидроциклона без перечистки (ГЦ) и с пристенной перечисткой (ГЦП):

1, 3, 5 – исходный продукт, слив, пески ГЦ-1000;
2, 4, 6 – исходный продукт, слив, пески ГЦП-1000

Список литературы

1. Исследование и промышленное применение гидроциклонов [Текст] / Под ред. В.В. Найденко и др. // Тез. докл. первого симпозиума. – М.: Недра, 1981. – 267 с
2. Акопов М.Г. Основы обогащения углей в гидроциклонах [Текст] / М.Г. Акопов. – М.: Недра, 1967. – 177 с.
3. Денисенко А.И. Технология обработки угольных шламов в многопродуктовом центробежном аппарате [Текст] / А.И. Денисенко, Е.В. Соловьёва, Б.Ф. Зарецкий // Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1990. – Вып. 40. – С. 52-57.
4. Обратное водоснабжение углеобогащительных фабрик [Текст] / И.С. Благов, М.А. Борц, Б.И. Вахрамеев и др. – М.: Недра, 1980. – 215 с.
5. Шломин А.Н. Интенсификация процесса классификации зернистых угольных и редкометалльных продуктов в гидроциклонах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец.05.15.08 "Обогащение полезных ископаемых" / А.Н. Шломин. – Днепропетровск, 1983. – 24 с.
6. Кривошеков В.И. Разработка и применение прямоточного цилиндрического гидроциклона для классификации угольных шламов: автореф. дис. на соиск. наук. степени канд. техн. наук: спец.05.15.08 "Обогащение полезных ископаемых" / В.И. Кривошеков. – Днепропетровск, 1983. – 24 с.
7. А.с. 1655575 СССР, МКИ В 03 В 5/34. Гидроциклон для классификации и обогащения полезных ископаемых / Н.Г. Бедрань, В.И. Кривошеков, Я.С. Гольдберг. (СССР). – Опубл. 15.06.91. Бюл. № 22.
8. Кривошеков В.И. Предпосылки эффективной работы гидроциклона [Текст] / В.И. Кривошеков // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн.зб. – 1999. – Вип.5(46). – С. 72-77.

© Кривошеков В.И., Медведева А.А., 2017

*Надійшла до редколегії 27.12.2016 р.
Рекомендована до публікації д.т.н. О.Б. Блюссом*