

**Е.Е.АНДРЕЕВ**, канд. техн. наук, доцент, *opilvv@mail.ru*

**В.В.ЛЬВОВ**, канд. техн. наук, доцент, *opilvv@mail.ru*

**А.В.ФАДИНА**, студентка, *fadina2101@rambler.ru*

*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург*

**E.E.ANDREEV**, PhD in eng. sc., associate professor, *opilvv@mail.ru*

**V.V.LVOV**, PhD in eng. sc., associate professor, *opilvv@mail.ru*

**A.V.FADINA**, student, *ledizet@rambler.ru*

*National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg*

## ПРИЧИНЫ И ЗНАЧЕНИЕ ИЗГИБОВ В КРИВЫХ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОЦИКЛОНА

Отклонения формы кривых эффективности гидроциклона от идеальной *S*-формы, или так называемые изгибы, были давно рассмотрены и представлены в различных литературных источниках. Эти изгибы могут быть разделены на две категории: «грубые» изгибы, которые вызваны различиями в плотности разделяемых полезных ископаемых, и «незначительные» изгибы, причины которых объясняются множеством конкурирующих гипотез. Существующая литература обращается либо к незначительному, либо к грубому изгибу, при этом случай их одновременного возникновения не был изучен. В данной работе представлены результаты внутризаводских исследований и лабораторных экспериментов гидроциклона, которые показывают и грубые, и незначительные изгибы, а также рассмотрено практическое значение обоих типов изгибов.

**Ключевые слова:** гидроциклон, кривая эффективности, «грубый» изгиб, «незначительный» изгиб, внутризаводские исследования, лабораторные эксперименты.

## CAUSES AND SIGNIFICANCE OF INFLECTIONS IN HYDROCYCLONE EFFICIENCY CURVES

Deviations of the shape of hydrocyclone efficiency curves from the ideal *S*-shape have long been reported, appearing as changes in slope, or inflections. These inflections can be divided into two categories: coarse inflections, which are caused by differences in density of the minerals being separated, and fine inflections, for which there are a number of competing hypotheses concerning their cause. The existing literature addresses either the fine inflection or the coarse inflection, but no papers have reported both types of inflection occurring at once. This paper presents hydrocyclone results from both in-plant studies and laboratory experiments that show both coarse and fine inflections and the industrial significance of both types of inflections are discussed.

**Key words:** hydrocyclone, efficiency curve, coarse inflection, fine inflection, in-plant studies, laboratory experiments.

Эффективность разделения минеральных частиц в гидроциклоне определяется используемыми кривыми эффективности, которые показывают вероятность попадания частицы в пески гидроциклона в зависимости от ее крупности. Если необходимо получить

кривую эффективности гидроциклона стандартной *S*-формы, то можно предсказать скорректированную крупность [1]:

$$d50_c = \frac{50,5 D_c^{0,46} D_i^{0,6} D_o^{1,21} \exp(0,063\varphi)}{D_u^{0,71} h^{0,38} Q^{0,45} (\rho_s - \rho)^{0,5}},$$

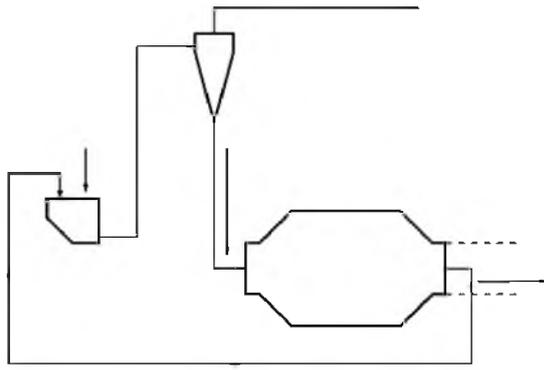


Рис.1. Конфигурация схемы «гидроциклон – галечная мельница»

где  $d50_c$  – скорректированная крупность частицы  $d50$ , мкм;  $D_c$  – диаметр циклона, см;  $D_i$  – входной диаметр, см;  $D_o$  – диаметр сливного отверстия, см;  $\phi$  – объемная фракция твердых частиц в исходном питании;  $D_u$  – диаметр пескового отверстия, см;  $h$  – высота свободного водоворота, см;  $Q$  – объемный расход исходного питания, л/мин;  $\rho_s$  – плотность твердого, г/см<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность жидкости, г/см<sup>3</sup>.

Однако существует множество причин, по которым кривая эффективности не является такой единообразной, легко моделируемой формой. На кривой появляются изгибы, вследствие чего изменяется ее наклон, а в крайних случаях кривая может полностью изменить направление.

На обогатительной фабрике был исследован концентрат магнетита, расположенный в районе железной руды озера Верхнего. Перерабатываемое исходное пи-

тание содержит приблизительно равное количество высокоплотного минерала (магнетит,  $\rho = 5,18$  г/см<sup>3</sup>) и малой плотности (кварц,  $\rho = 2,65$  г/см<sup>3</sup>) минерала, гарантируя, что форма кривых эффективности гидроциклонов будет в равной степени подвержена воздействию обоих полезных ископаемых.

Выбранные гидроциклоны были частью стандартной схемы «гидроциклон – галечная мельница» (рис.1). Схема обычно работает с 14 циклонами, с двумя дополнительными циклонами, используемыми в качестве резерва на случай выхода из строя основного оборудования.

Образцы были отобраны из исходного питания циклона, песков циклона и слива как часть полной фиксированной производительности обогатительной фабрики. Исследования крупности образцов были выполнены тремя методами:

1. Мокрое грохочение по классу 25 мкм с использованием проверочных плетеных проволочных сит, с последующим сухим грохочением частиц +25 мкм на ситовом анализаторе Ro-Tap.

2. Микропросеивание сухих порошков с использованием сит из никелевой фольги в приборах Sonic Sifter (звуковой грохот), которые позволяют просеивать частицы размером до 10 мкм.

3. Анализ крупности частицы посредством дифракции на лазере Microtrac для измерения размеров частицы до 1 мкм, прежде всего для проверки на точность исследований сита.

#### Результаты опробования продуктов гидроциклона на обогатительной фабрике

Проба	Исходный материал			Фракция +0,185 мм			Фракция -0,185 мм		
	Полный	Магнитный	Немагнитный	Полный	Магнитный	Немагнитный	Полный	Магнитный	Немагнитный
Исходное питание гидроциклона	427,5	257,7 (60,30 %)	169,8 (39,70 %)	226,9	122 (53,80 %)	104,9 (46,20 %)	200,6	135,7 (67,60 %)	64,9 (32,40 %)
Слив гидроциклона	128,1	73,5 (57,40 %)	54,6 (42,60 %)	16,1	7 (43,50 %)	9,1 (56,50 %)	112	66,5 (59,40 %)	45,5 (40,60 %)
Пески гидроциклона	299,3	201,4 (67,30 %)	97,9 (32,70 %)	207,1	115,8 (55,90 %)	91,3 (44,10 %)	92,2	85,6 (92,80 %)	6,6 (7,20 %)

Для просеянных образцов каждая отдельная фракция крупности была подвергнута химическому анализу методом титрования дихромата для определения содержания железа. Гранулометрический состав и данные опробования были сбалансированы, и концентрация магнетита в каждой фракции крупности была вычислена из проб железа (см. таблицу).

По нашим наблюдениям, фракция  $-0,185$  мм в песковом продукте гидроциклона значительно богаче магнетитом, чем фракция той же крупности в сливе гидроциклона. Это указывает на то, что магнетит удерживается в цикле измельчения до получения более мелкого размера по сравнению с силикатной породой, и как результат, значительно концентрируется в более мелких фракциях.

Исследования крупности отдельных компонентов (магнетит и кварц) были использованы для построения кривых эффективности гидроциклона для фазы магнетита и кварца (рис.2).

Кривые эффективности иллюстрируют влияние различной плотности полезных ископаемых на крупность разделения в гидроциклоне. Гидроциклон, удаляя довольно крупный кварц ( $d_{50} = 39$  мкм) из цикла измельчения, не выводит магнетит до тех пор, пока не будет достигнут более мелкий размер ( $d_{50} = 20$  мкм).

Пески гидроциклона имеют крупность от 20 до 39 мкм, что свидетельствует о преобладании магнетита. В этом случае материал возвращается в цикл и будет повторно измельчаться до тех пор, пока не станет достаточно тонкоизмельченным для выведения его из процесса измельчения. В результате этого существенно накапливается магнетит в песках гидроциклона данного диапазона крупности.

Эффект этого удержания фракции более высокой плотности в цикле виден на общей кривой эффективности (рис.2). Кривые эффективности магнетита и кварца очень близки к идеальной S-форме, однако общая кривая имеет изгиб. Это свидетельствует о том, что питание циклона состоит из приблизительно равных количеств магнетита и кварца крупностью более чем 39 мкм;

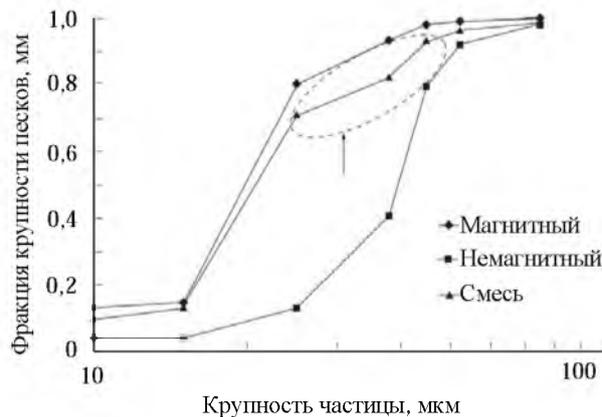


Рис.2. Кривые эффективности гидроциклона для проб слива и песков, отобранных из действующего гидроциклона

но более мелкие фракции крупности в основном состоят из магнетита. В результате общая кривая эффективности представляет первоначально среднее значение кривых эффективности магнетита и кварца, но затем быстро меняет свое направление и достигает значений, где кварц выводится из цикла. Результат – изгиб в общей кривой эффективности.

Такой изгиб происходит только тогда, когда питание циклона обогатилось более плотным минералом меньшей крупности. Если у высоко- и низкоплотных полезных ископаемых будет такое же распределение по крупности, то общая массовая кривая эффективности просто будет их средним значением. Изгиб наблюдается, когда общая кривая изменяет направление от низкоплотной к высокоплотной кривой. Это зависит от различия гранулометрических характеристик полезных ископаемых.

Чтобы более точно оценить явление грубого изгиба и определить, как относительные распределения по крупности влияют на степень изгиба, был выполнен ряд экспериментов с использованием контролируемых распределений по крупности для питания гидроциклона. Однако на фабрике невозможно было определить, происходил ли незначительный изгиб. Поэтому были проведены лабораторные эксперименты.

Испытательная установка с гидроциклоном Krebs (диаметр 10,2 см) состояла из зумпфа, центробежного насоса с перемен-

ной скоростью, циркулирующего материала непрерывно через гидроциклон. Масляный манометр контролировал входное давление гидроциклона. Расходы в испытательной установке гидроциклона были измерены сверхзвуковым расходомером Doppler. Образцы слива и песков гидроциклона отбирались с помощью специально предназначенного пробоотборника таким образом, чтобы относительные расходы этих двух потоков могли быть точно измерены. Гранулометрические составы были определены с использованием лазерного дифракционного гранулометрического анализатора Лидс и Northrup Microtrac.

В качестве испытуемого материала использовались кварцевый песок мелкого помола и концентрат магнетита. Эксперименты сначала проводились только с магнетитом, а затем с кварцем, для последующих испытаний использовались смеси магнетита и кварца. Все пробы были отобраны в трех экземплярах в каждом рабочем режиме гидроциклона, и каждая из трех проб была проанализирована отдельно, чтобы определить случайные изменения от теста к тесту. Во всех экспериментах случайное изменение в каждой фракции крупности песков было менее чем 0,01 единицы. Это меньше, чем величина изгибов, которая наблюдалась ранее, демонстрируя, что изгибы фактически присутствовали в процессе, а не появились из-за экспериментальной неточности.

Эксперименты были проведены для трех различных процентных отношений твердого для каждого минерала (2,5; 5,5 и 16,5 % твердого для магнетита; 2,3; 8,4 и 16,9 % твердого для кварца).

Дополнительные эксперименты проводились со смесями 50:50 по массе магнетита и кварца. Было проведено два ряда экспериментов с очень отличающимися гранулометрическими составами кварца и магнетита. Это было сделано, чтобы получить максимально грубый изгиб. В первой серии экспериментов кварц был продуктом песков (грубый) из экспериментов циклона с использованием одного только кварца, в то время как магнетит (тонкий) был продуктом слива из экспериментов циклона с использованием одного только

магнетита. Это привело к незначительному совпадению между гранулометрическими составами магнетита и кварца (рис.3).

Во второй серии экспериментов (50:50 магнетит – кварц) используемый кварц был подвергнут осаждению для удаления самых мелких частиц, и магнетит, который был подвергнут осаждению для удаления самых крупных частиц с последующим измельчением крупных частиц магнетита в дисковой мельнице и возвращением обратно полученного магнетита более мелкого гранулометрического состава. Это привело к значительному расхождению между гранулометрическими составами магнетита и кварца, и магнетит стал намного мельче, чем в первой серии экспериментов. Для этих экспериментов процентное отношение твердого варьировалось от 30 до 2,5 %, а рабочее давление циклона варьировалось от 48,2 до 137,9 КПа для изменения расходов.

Результаты для отдельных полезных ископаемых не показывали грубый изгиб из-за питания, состоящего из полезных ископаемых одной плотности. Однако и кварц, и магнетит, действительно, показывают незначительный изгиб.

Для кварца незначительный изгиб был намного больше, чем случайные изменения между тройными пробами. На это совсем немного повлияло процентное отношение твердого и абсолютно не повлиял расход, хотя размер  $d_{50}$  для части кривой был различным, как рассчитано в приведенном уравнении.

Для чистого магнетита незначительный изгиб (рис.4) был намного более явным, чем для кварца (см. рис.3). Питание магнетита имело гранулометрический состав, похожий на питание кварца, и ожидалось, что незначительный изгиб будет похож в обоих случаях, если бы тот же самый механизм был ответственен за это. Таким образом, очень значительные различия между кварцем и магнетитом, и фактом, что магнетит намного более чувствителен к расходу и процентному отношению твердого, ясно указывают, что различные механизмы оказывают влияние на процесс классификации в каждом случае.

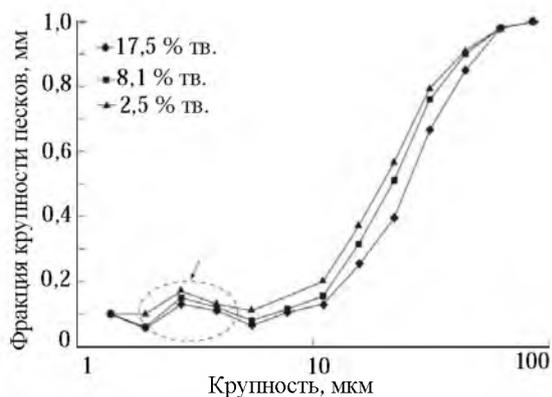


Рис.3. Кривые эффективности для чистого кварца как функции процентного отношения твердого при постоянном расходе жидкости (110 л/мин)

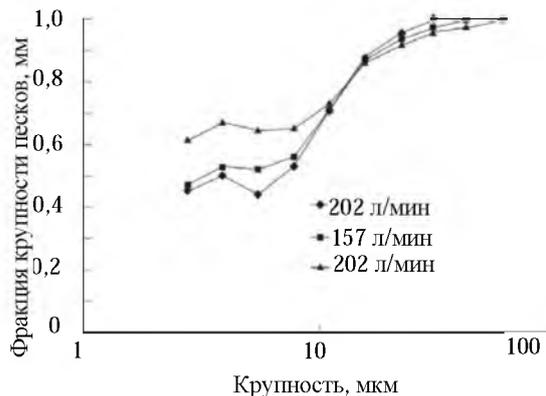


Рис.4. Кривые эффективности для чистого магнетита как функции расхода жидкости

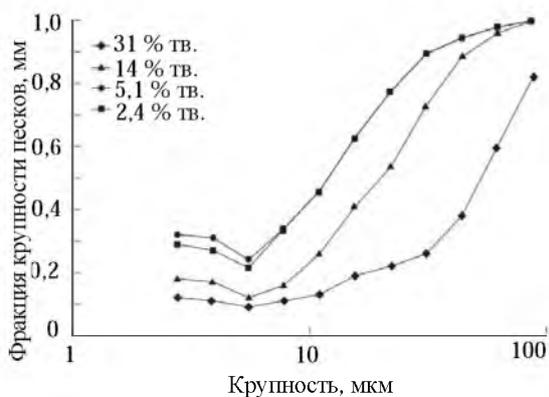


Рис.5. Представительные кривые эффективности для первой серии экспериментов со смесью минералов

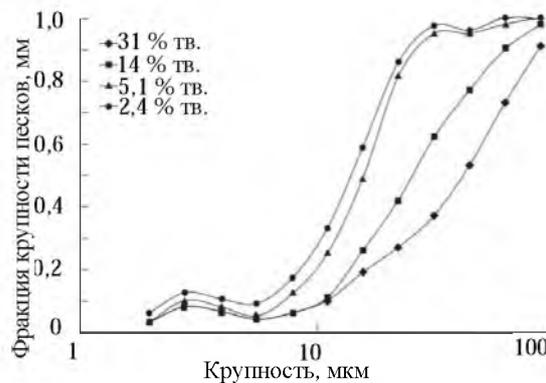


Рис.6. Изменения в кривых эффективности для смеси кварц – магнетит с очень небольшим наложением между гранулометрическими составами магнетита и кварца

Эксперименты со смесями полезных ископаемых показали и грубый, и незначительный изгиб. В первой серии экспериментов, с относительно большим наложением размеров частицы магнетита и кварца, грубый изгиб в кривых эффективности не наблюдался, хотя незначительный изгиб был представлен (рис.5). Во второй серии экспериментов, с очень небольшим наложением между гранулометрическими составами магнетита и кварца, наблюдался весьма видимый грубый изгиб при низких значениях процентного отношения твердого (рис.6).

Незначительный изгиб также наблюдается и в этой серии экспериментов. Несмотря на то, что весь материал, производящий незначительный изгиб в этих экспериментах, является магнетитом, поведение кривой эффективности подобно кривой эффектив-

ности для кварца (см.рис.3), чем для кривой магнетита (см.рис.4). Это свидетельствует о том, что величиной незначительного изгиба управляет природа грубых частиц, а не мелких частиц. Это несовместимо с моделью переноса для незначительного изгиба [2], поскольку в этом случае незначительным изгибом управляли бы полностью особенности мелких частиц.

Кроме того, поведение незначительного изгиба не полностью согласуется с гидродинамической моделью [3], поскольку эта модель не предсказала бы такое большое изменение в поведении, обусловленное просто изменением плотности более крупных частиц. Результат намного более согласуется с накоплением мелких частиц на поверхности более крупных частиц. В этой особой системе есть потенциал для магнитного накоп-

ления тонких частиц магнетита на крупном магнетите, который составлял бы намного более высокую ценность незначительного изгиба для чистого магнетита, чем для чистого кварца.

Во время эксперимента со смесью минералов также была получена следующая зависимость: когда магнетит был мельче и количество материала крупностью от 1 до 5 мкм увеличилось, незначительный изгиб уменьшался.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что существует два особых явления, которые приводят к изгибам в кривых эффективности гидроциклона. Грубый изгиб вызван присутствием тонких, высокоплотных частиц, объединенных с более крупными, низкоплотными частицами в питании циклона. Эти результаты в кривой эффективности определяются более крупными низкоплотными и тонкими высокоплотными материалами с изгибом, происходящим, когда кривая меняет свое направление. В цикле измельчения такой изгиб свидетельствует о том, что преимущественно высокоплотные частицы остаются в цикле измельчения и переизмельчаются. Так как переизмельчение материала приводит к значительному расходу энергии и является причиной снижения ценности полезных ископаемых, проявление грубого изгиба в кривой эффективности гидроциклона на обогатительной фабрике представляет собой большую проблему для технологов, которую необходимо срочно решать.

Незначительный изгиб был объяснен многими теориями, некоторые из которых не

полностью учитывают поведение кривой эффективности, показанное в представленных результатах испытаний. Наблюдаемое поведение в наибольшей степени соответствует механизму накопления материала, при котором тонкие частицы собираются на крупных частицах и уносятся в пески гидроциклона. В результате незначительный изгиб не имеет большого практического значения, так как отчетливо виден только в тех случаях, когда весьма маленький объем питания гидроциклона зависит от крупности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Поваров А.И.* Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М., 1978. 267 с.
2. *Del Villar R.* Modelling the cyclone performance with a size dependent entrainment factor / R.Del Villar, J.A.Finch // *Minerals Engineering*. 1992. Vol.5(6). P.661-669.
3. *Napier-Munn T.J.* Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization / T.J.Napier-Munn, S.Morrell, R.D.Morrison, T.Kojovic // Brisbane, Australia: JKMRС, University of Queensland. 1996. P. 326-327.
4. *Neesse Th.* Separation of finest particles in hydrocyclones / Th.Neesse, J.Dueck, L.Minkov // *Minerals Engineering*. 2004. Vol.17. P.689-696.

#### REFERENCES

1. *Povarov A.I.* Hydrocyclones in Mineral processing plants. M., 1978. 267 p.
2. *Del Villar R.* Modelling the cyclone performance with a size dependent entrainment factor / R.Del Villar, J.A.Finch // *Minerals Engineering*. 1992. Vol.5(6). P.661-669.
3. *Napier-Munn T.J.* Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization / T.J.Napier-Munn, S.Morrell, R.D.Morrison, T.Kojovic // Brisbane, Australia: JKMRС, University of Queensland. 1996. P.326-327.
4. *Neesse Th.* Separation of finest particles in hydrocyclones / Th.Neesse, J.Dueck, L.Minkov // *Minerals Engineering*. 2004. Vol.17. P.689-696.