

УДК 622.7

**Н.И. Коннова, К.Е. Ананенко, Д.В. Кузьмичев**  
**О НОВОМ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОМ ПРИЗНАКЕ**  
**ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ**

Представлены результаты одной из последних научных разработок, выполненных под руководством Верхотурова Михаила Васильевича. Разработана технология глубокого гравитационного обогащения, сущность которой заключается в использовании в качестве отличительного признака разделения минералов, соотношения размеров и масс (инерционных сил) частиц легкого и тяжелого минералов близкой гидравлической крупности.

*Ключевые слова:* гравитационное обогащение, концентрат, руда, классификация, гидравлическая крупность, равнопадаемость, центробежное поле.

---

Памяти учителя — профессора,  
доктора технических наук  
Верхотурова М. В. посвящается

**Э**ффективность гравитационных методов обогащения снижается с уменьшением крупности исходного материала особенно для классов менее 0,5—0,1 мм. Основная причина в том, что в процессе сепарации частиц имеет место их флюктуация.

В работе представлена новая технология глубокого гравитационного обогащения, основанная на классификации исходного материала на узкие классы гидравлической крупности, с минимизацией флюктуации, и дальнейшее их разделение, в том числе, с использованием нетрадиционных отличительных признаков.

В качестве исходного материала для проведения эксперимента была использована смесь порошков кварца и железа, имитирующих смесь минералов с разницей в плотностях  $2,64 \text{ кг/м}^3$ . Анализ продуктов разделения проводился посредством выделения магнитной фракции.

Методика проведения экспериментов включала следующие этапы: подготовку исходного материала по клас-

сам близкой гидравлической крупности на гидравлическом классификаторе (с учетом данных по скоростям падения); разделение классов близкой гидравлической крупности по инерционным силам и крупности; определение оптимальных технологических параметров обогащения для каждого класса гидравлической крупности; анализ продуктов обогащения.

Исследования разделения зернистых материалов на классификаторе «Горка», разработка кафедры обогащения полезных ископаемых СФУ [1, 2], по разнице в инерционных силах, проводились с изменением угла наклона, расхода воды (толщины пленки) и высоты загрузки материала.

В табл. 1 представлены результаты разделения при оптимальных технологических показателях для различных классов близкой гидравлической крупности.

Из результатов следует:

1. Наиболее благоприятный угол наклона классификатора зернистых материалов равен  $80^\circ$ . Увеличение угла приводит к отрыву частиц от по-

Таблица 1

**Результаты разделения для смеси порошков кварца и железа близкой гидравлической крупности при оптимальных \* технологических показателях**

Концентрат	Выход, %			Содержание, %			Извлечение, %			Критерий Ханкока	Степень концентрации
	Хвостов	Исходного	В концентрате	В хвостах	В исходном	В концентрат	В хвосты	В исходный			
Крупность материала: кварц – 10 мм; Fe-порошок — 3 мм * <sup>1</sup>											
3	97	100	100	0	3	100	0	100	100	≥33	
Крупность материала: кварц – 5 мм; Fe-порошок — 1,5 мм * <sup>2</sup>											
3,25	96,75	100	85	0,25	3	100	0	100	91,5	28,3	
Крупность материала: кварц – 3 мм; Fe-порошок — 1 мм * <sup>3</sup>											
15	85	100	20	0	3	92	8	100	87,6	6,7	

\*Оптимальные технологические показатели для каждой крупности материала различны, установленные экспериментально и составляют:  
\*<sup>1</sup> угол наклона – 80°; расход воды – 2,3 л/мин; высота загрузки материала – 2 м  
\*<sup>2</sup> угол наклона – 80°; расход воды – 1,2 л/мин; высота загрузки материала – 2 м  
\*<sup>3</sup> угол наклона – 80°; расход воды – 0,9 л/мин; высота загрузки материала – 2 м

верхности и свободному полету частиц, уменьшение угла наклона аппарата влечет за собой уменьшение скорости, развиваемой частицами, и как следствие уменьшение инерционных сил; последующее уменьшение угла наклона приводит к образованию «водной подушки» и осаждению в ней частиц, что способствует резкому ухудшению результатов разделения.

2. Оптимальный расход воды для каждой крупности материала разный, и устанавливается экспериментально. Увеличение расхода воды (а следовательно и толщины пленки) способствует ухудшению технологических показателей, вследствие удерживания частиц пустой породы пленкой воды и транспортированию этих частиц в приемник для концентрата.

Снижение расхода приводит к уменьшению толщины взвесенесущей пленки, и как следствие, частицы центрального компонента способны разрывать

капиллярные связи и под действием инерционных сил следовать в приемник для пустой породы.

3. Материал крупностью менее 5 мм трудно поддается разделению, происходит накапливание материала на поверхности сепаратора, увеличение расхода воды (толщины пленки) влечет за собой лишь вынос пустой породы в приемник для концентрата.

Второе направление исследований разделения минеральной смеси осуществляли на барабанно-пленочном сепараторе [1, 2] по разнице в инерционных силах.

Результаты свидетельствуют о том, что подготовка материала по равнопадаемости позволяет увеличить границу разделения и, следовательно, повысить качество концентрата, а также снизить нижний предел крупности обогащаемого материала. Последнее связано с появлением нового разделительного признака — разницы в инерционных силах.

18 Таблица 2

**Анализ разделительных признаков классов близкой гидравлической крупности смеси порошков кварца и железа**

Гидравлическая крупность <sup>*1</sup> , см/с	Крупность частиц, мм		Соотношение размеров легкой и тяжелой частицы ( $d_{\text{SiO}_2}/d_{\text{Fe}}$ )	Масса, гр		Соотношение масс легкой и тяжелой частицы ( $m_{\text{SiO}_2}/m_{\text{Fe}}$ )	Соотношение плотностей тяжелой и легкой частицы ( $\delta_{\text{Fe}}/\delta_{\text{SiO}_2}$ )
	Кварца	Fe		Кварца	Fe		
0,56	0,09	0,041	2,2	0,0000010	0,000000260	3,9	2,64
1,2	0,126	0,061	2,1	0,0000028	0,000000814	3,4	2,64
2,1	0,18	0,08	2,2	0,0000081	0,000001885	4,3	2,64
4,1	0,41	0,11	3,7	0,0000956	0,000005143	18,6	2,64
5,3	0,51	0,14	3,6	0,0001840	0,000010226	18,0	2,64
6,7	0,63	0,18	3,5	0,0003468	0,000020658	16,8	2,64
9,4	1	0,25	4,0	0,0013868	0,000057048	24,3	2,64
12,5	1,5	0,33	4,5	0,0046806	0,000134150	34,9	2,64
16,7	2,3	0,44	5,2	0,0168736	0,000319896	52,7	2,64
20	3,2	0,53	6,0	0,0454438	0,000549477	82,7	2,64
25	5	0,66	7,5	0,1733542	0,001073197	161,5	2,64

<sup>\*1</sup> данные гидравлической крупности и размеров частиц представлены по Т.Г. Фоменко [22]

Таблица 3

**Результаты разделения частиц близкой гидравлической крупности на барабанно-пленоочном сепараторе**

Средняя гидравлическая крупность класса частиц, см/с	Без овализации и обработки реагентами		После овализации		После овализации и обработки реагентами	
	Извлечение металла в концентрат, %	Степень концентрации	Извлечение металла в концентрат, %	Степень концентрации	Извлечение металла в концентрат, %	Степень концентрации
0,56	100	1	100	1	100	1
1,2	100	1	100	1	100	1
2,1	100	1	17	1,2	35	3,1
4,1	100	1	54	2,3	85	7,3
5,3	22	2,1	68	4,4	91	9
6,7	29	2,4	79	6,1	93	10,5
9,4	37	3,5	85	8,3	98	15
12,5	73	4,2	94	10,2	100	≥33
16,7	88	14	97	17,4	100	≥33
20,0	95	21	100	≥33	100	≥33
25,0	97	26,6	100	≥33	100	≥33

Таблица 4

**Результаты разделения частиц смеси кварц-касситерит близкой гидравлической крупности**

Средняя гидравлическая крупность класса частиц, см/с	По инерционным силам				Методом рассева	
	в гравитационном поле		в центробежном поле (после овализации и обработки реагентами)			
	Извлечение металла в концентрат, %	Степень концентрации в концентрат	Извлечение металла в концентрат, %	Степень концентрации в концентрат	Извлечение металла в подрешетный, %	Степень концентрации в концентрат
0,56	100	1	100	1	27	3,5
1,2	100	1	100	1	52	8,3
2,1	100	1	35	3,1	73	22,7
4,1	100	1	85	7,3	98	31,3
5,3	100	1	91	9	100	$\geq 33$
6,7	100	1	93	10,5	100	$\geq 33$
9,4	100	1	98	15	100	$\geq 33$
12,5	100	1	100	1,33	100	$\geq 33$
16,7	100	1	100	1,33	100	$\geq 33$
20,0	100	6,7	100	1,33	100	$\geq 33$
25,0	92	28,3	100	1,33	100	$\geq 33$

Предпосылки для разделения частиц по разнице в их массах, а также подробное описание и вектора сил, действующих на частицу, подробно изложены в научных трудах М.В. Верхотурова [1, 2, 9, 11, 12].

Однако, недостатком барабанно-пленоочного сепаратора является то, что разделение на самом деле осуществляется по совокупности сил, действующих на частицы. Так, например, большое влияние оказывает форма и краевой угол смачиваемости частицы. Последнее приводит к стиранию границы разделения и взаимозащорению продуктов.

В этой связи проведен ряд исследований, включающий предварительную овализацию частиц, а также обработку материала реагентами (в качестве реагента использована олеиновая кислота, избирательно гидрофобизирующая поверхность кварца). Установлено их влияние на сепарацию частиц.

Анализ табличных данных подтверждает изложенные выше предположения о применимости данного метода гравитационного обогащения в силу того, что преобладающим разделительным признаком является разница в массах разделяемых компонентов.

Данный разделительный приз-

нак увеличивается с возрастанием в разнице плотностей и крупности частиц, подвергаемых сепарации.

На основании теоретических предпосылок к совершенствованию процесса сепарации частиц проведены исследования, результаты которых представлены в табл. 3.

Согласно полученных результатов можно сделать вывод о том, что форма частиц и краевой угол смачивания минералов играют важную роль в процессе разделения, однако главным фактором, за счет которого получены данные показатели является подготовка материала по гидравлической крупности. В целом же, используя совокупность подготовки материала, его овализации, а также гидрофобизации поверхности кварца нижний предел крупности обогащаемого материала существенно снижен, а качественные и количественные показатели значительно возросли.

Исследование разделения минеральной смеси близкой гидравлической крупности по разнице в крупности частиц проводили с учетом равнопадаемости. Известно, что равнопадающие частицы двух минералов с различной плотностью, имеют разные диаметры. В своем учебнике П. В. Плященко [23] говорит о том, что «если бы мы произвели классификацию по скоростям падения руды, состоящей из зерен различных минералов, то достигли бы того, что в одном классе зерна различных минералов будут иметь различную величину. Поэтому зерна руды, состоящей из зерен кварца и свинцового блеска, имеющих одинаковую скорость падения 150,31 мм/с, можно затем отделить друг от друга на сите с отверстиями 0,5 мм, так как все зерна кварца были бы размером 1,6 мм, зерна же свинцового блеска размером 0,45 мм, и первые остались бы поверх сита, вторые же просеялись бы».

Причиной того, что ранее данные опыты были неосуществимы является отсутствие гидравлического сепаратора, способного выделить классы близкой гидравлической крупности. В настоящее время существует гидравлический сепаратор способный разделить

исходный поток на сколь угодно узкие классы гидравлической крупности, в связи с чем снова стала актуальной проблема разделения частиц близкой гидравлической крупности на ситах.

Поскольку частицы минералов имеют неправильную форму, также как и при сепарации на барабанно-пленочном сепараторе, в целях повышения эффективности разделения очевидным является преимущества овализация частиц разделяемых минералов перед разделением на грохотах.

В табл. 4 представлены результаты проведения эксперимента в сравнении с другими методами гравитационного обогащения по инерционным силам. Анализ проведенных исследований показывает, что разделение в центробежном гравитационном поле эффективно начиная с крупности 0,1 мм (гидравлическая крупность 2,1 см/с) и увеличивается с ее возрастанием. Рассев смеси на ситах после предварительной классификации и овализации еще более эффективен. Разделение же смеси по разнице в массах в гравитационном поле может быть применимо для крупности от 1 мм.

В данной работе представлена разработка технологии глубокого гравитационного обогащения, сущность которой заключается в использовании в качестве отличительного признака разделения минералов, соотношения размеров и масс (инерционных сил) частиц легкого и тяжелого минералов близкой гидравлической крупности.

Подготовка материала по классам гидравлической крупности осуществлялась на гидравлическом сепараторе, после чего продукты классификации обогащались на классификаторе «Горка», капиллярно-пленочном аппарате и по соотношению инерционных сил частиц и их капиллярных связей с пленкой воды.

В результате классификации на гидравлическом сепараторе получены продукты, соотношение масс (инерционных сил) которых, в несколько раз превосходит соотношение плотностей частиц тяжелого и легкого минералов близкой гидравлической крупности.

Следовательно, данный отличительный признак можно с большей эффективностью использовать для обогащения полезных ископаемых. Соотношение масс возрастает с увеличением гидравлической крупности и соотношения плотностей разделяемых компонентов.

Полученные классы гидравлической крупности характеризуются также значительной разницей в соотношении их размеров, что позволяет разделять смесь на ситах с размером ячейки промежуточного диаметра.

Последующее обогащение полученных гидравлических классов на классификаторе «Горка» и капиллярно-пленочном аппарате по соотношению инерционных сил частиц и их капиллярных связей с пленкой воды позволяет получить высокие технологические показатели (до 100 % извлечение, при 100 % содержании тяжелого в концентрате).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верхогуров М.В. Гравитационные методы обогащения: учеб. для вузов, — М. МАКС Пресс, 2006. — 352 с.
2. Верхогуров М.В. Обогащение золота: учебн. пособие / ГАЦМиЗ. — Красноярск, 1998. — 128 с.
3. Евдокимов С.И., Солоденко А.А., Паньшин А.М. Обоснование целесообразности предварительной концентрации руд с применением осадки // Горно-добывающий комплекс России: состояние и перспективы развития: Материалы 3 Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию Героя Социалистического Труда, академика Михаила Ивановича Агошкова, Владикавказ, 10—13 нояб., 2005. — Владикавказ, 2005. — С. 157—159.
4. Замятин О.В., Маньков В.М. Разработка и освоение технологий извлечения мелкого и особо мелкого самородного золота из россыпей с использованием принципиально нового типа высокопроизводительных отсадочных машин// Обогаш. руд. — 2005. — № 6. — С. 48—53.
5. Митин Л.А. Интенсификация гравитационного процесса обогащения — эффективный путь извлечения мелкого и тонкого золота из россыпей// Колыма. — 2002. — № 1. — С. 43—47.
6. Митин Л.А. Интенсификация процесса отсадки для повышения извлечения мелкого и тонкого золота из песков россыпных месторождений// Обогаш. руд. — 2002. — № 4. — С. 15—17.
7. Козлов П.В. Обогащение тонкодисперсных частиц полезных ископаемых пульсационной концентрацией/ Материалы Уральской горнопромышленной декады, — Екатеринбург, 2005. — С. 149—150.
8. Нечаев П.Б. Каскадная отсадка для обработки предварительно не классифицированного материала// Плаксинские чтения 2006 «Прогрессивные методы обогащения и технологии глубокой переработки руд цветных, редких и платиновых металлов»: Материалы Международного совещания, Красноярск, 2-8 окт., 2006. — Красноярск, 2006. — С. 97—98.
9. Верхогуров М.В., Колесникова Т.А., Самойлов В.Г., Малыхин Д.В., Русаков А.С. К надрешетной разгрузке алмазов и золота при отсадке мелких классов// Материалы Международного совещания «Современные методы оценки технологических свойств труднообогатимого и нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов и прогрессивные технологии их переработки (Плаксинские чтения 2004)», Иркутск, 13—17 сент.. 2004. — М., 2004. — С. 223—224.
10. Пат. 2262385 Россия, МПК<sup>7</sup> B 03 B 5/70 B 03 C 1/04. Шлюз для осаждения концентратов тяжелых минералов из пульпы и улавливающий коврик для него: Кардаш В.Т.; заявитель и патентообладатель. — N 2003136036/03; Заявл. 15.12.2003; Опубл. 20.10.2005.

11. Пат. 2278736 Россия, МПК<sup>7</sup> В 03 В 5/72. Шлюз маятникового типа для улавливания тяжелых минералов: Верхотуров М.В.; заявитель и патентообладатель Гос. образ. учрежд. высш. проф. образ. Гос. ун-т цвет. мет. и золота. — № 2004136455/03; Заявл. 14.12.2004; Опубл. 27.06.2006
12. Кисляков В.Е. Шлюз с непрерывной разгрузкой концентрата// Труды 2 Международного симпозиума «Золото Сибири: геология, геохимия, технология, экономика», Красноярск, 4-6 дек., 2001. — Красноярск, 2001. — С. 246.
13. Ковлевков И.И. Извлечение мелкого золота в магнитной постели с управляемой шерховатостью и улавливающей емкостью // Горн. инф. — анал. бюл. / Моск. гос. горн. ун-т. — 2001. — № 8. — С. 203—204.
14. Ковлевков И.И., Андреев В.С. Магнитосегрегационный шлюз с непрерывной разгрузкой концентрата// Труды Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 12-15 нояб., 2002. Ч. 2. — Екатеринбург, 2002. — С. 102-105.
15. Тиунов А.А., Башлыкова Т.В., Золотарев В.Н. Совершенствование гравитационной технологии извлечения благородных металлов// Материалы международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», Екатеринбург, 6-10 июля, 2004. — Екатеринбург, 2004. — С. 283-284.
16. Тиунов А.А., Башлыкова Т.В., Золотарев В.Н. Совершенствование гравитационной технологии извлечения благородных металлов// Материалы Международного совещания «Современные методы оценки технологических свойств труднообогатимого и нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов и прогрессивные технологии их переработки (Плакинские чтения 2004)», Иркутск, 13-17 сент.. 2004. — М., 2004. — С. 213-214.
17. Пат. 49298 Украина, МПК<sup>6</sup> В 03 В 5/74. Круглый концентрационный стол: Михайленко М.В.; заявитель и патентообладатель — № 2001107255; Заявл. 25.10.2001; Опубл. 16.09.2002
18. Богданович А.В., Васильев А.М. Особенности разделения частиц малой крупности на винтовом шлюзе// Материалы Международного совещания «Современные методы оценки технологических свойств труднообогатимого и нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов и прогрессивные технологии их переработки (Плакинские чтения 2004)», Иркутск, 13-17 сент.. 2004. — М., 2004. — С. 161-162.
19. Шумилов И.Х., Осташенко Б.А. Особенности обогащения руд с тонким и мелким золотом// 4 Конгресс обогатителей стран СНГ, Москва, 19-21 марта, 2003: Материалы Конгресса. Т. 2. — М., 2003. — С. 78-80.
20. Шумилов И.Х., Осташенко Б.А. Гравитационное обогащение золотосодержащих пород на винтовом сепараторе// Науч. рек. — нар. х-ву / Коми науч. центр УрО РАН. — 2002. — № 119. — С. 1-3.
21. Александров Н.Е., Бобров А.Н., Боброва О.П. Очистка кварцевого стекольного сырья от железосодержащих примесей гравитационными методами обогащения // IV Конгресс обогатителей СНГ, Москва, 19-21 марта, 2003 : Материалы Конгресса. Т. 2. — М., 2003. — С. 44-46.
22. Фоменко Т.Г. Гравитационные процессы обогащения полезных ископаемых, М.: Недра, 1966. — 421 с.
23. Ляшенко П.В. Гравитационные методы обогащения: учеб. для горных вузов. — М., Ленинград: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горнотопливной литературы, 1940. — 359 с. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Коннова Наталья Ивановна — кандидат технических наук, доцент, e-mail: kni757@mail.ru, Аナンенко Константин Евгеньевич — кандидат технических наук, старший преподаватель, Сибирский федеральный университет, Кузьмичев Дмитрий Викторович — аспирант Сибирского федерального университета, ведущий инженер производственно-технического отдела золотодобывающей компании ЗАО «ПОЛЮС».

