

Опыт применения флотомашины Джеймсон в компании Cleveland Potash Ltd., Северный Йоркшир, Англия

М. Дж. Бернс, Дж. Коутс, Л. Барнард

Cleveland Potash, Ltd. (CPL) является горнодобывающей компанией, занимающейся добычей и переработкой сильвинитовой руды, преимущественно KCl и NaCl, на месторождении эвапоритов в Северном Йоркшире, Англия. На обогатительной фабрике для получения продукта с высоким содержанием KCl - либо ультратонкого концентрата (-100 мкм), либо более грубого концентрата ($100-1100$ мкм) - применяется пенная флотация. Флотомашина Джеймсон испытывается в обоих циклах.

Хотя аминовый коллектор быстро придает KCl гидрофобные свойства, при извлечении из крупной фракции с высоким содержанием все же возникают затруднения. Более полное извлечение из этой медленно флотируемой фракции $+0,85$ мм повысило бы общую эффективность фабрики, способствуя отделению пустой породы и сушке концентратов и снижая нагрузку на цикл вторичного измельчения. Основные элементы цикла показаны на рис. 1.

Пилотные испытания

Пилотная флотомашина Джеймсон имела внутренний диаметр 520 мм и высоту примерно 5 м. Питание флотомашины обеспечивал шламовый насос Warman, поддерживающий расход $10 \text{ м}^3 \text{ч}^{-1}$ при $2,5$ бар на стороне питания. Время нахождения во флотомашине составляло по расчетам 2 минуты. Конструкция флотомашины схематично представлена на рис. 2.

Флотомашина Джеймсон применялась для флотации четырех разных потоков, представленных в таблице 1.

Флотация концентрата второй перечистой флотации

В тестировании флотации концентрата второй перечистой флотации вспениватель метил изобутил карбинол (MIBC) вводился непосредственно в линию всаса насоса при требуемой концентрации 5 ппм, необходимой для запуска и поддержания флотации. Граница между пульпой и пеной была установлена на уровне 30 см ниже порога флотомашины с помощью датчика пузырьков, реле и пневматического клапана хвостов. На данном этапе пена не промывалась насыщенным раствором.

Расход воздуха во флотомашине был установлен на уровне 50 л мин^{-1} , что соответствует коэффициенту скорости поверхностного подъема $0,41 \text{ см с}^{-1}$ и коэффициенту воздух-пульпа $1:3,33$. Скорость подъема равна частному от деления расхода воздуха на площадь сечения флотомашины, и имеет важное значение для расчета параметров масштабирования.

Флотация концентрата перечистой флотации

Условия флотации концентрата перечистой флотации оставались такими же, как описано выше. Содержание и извлечение были измерены в широком диапазоне содержаний в питании, что было необходимо для выполнения анализа производственного потенциала флотомашины Джеймсон. Плотность пульпы поддерживалась на уровне $15-20\%$ твердой фракции по весу, чтобы облегчить перекачивание и тем самым стабилизировать давление на стороне питания и расход воздуха во флотомашине на уровне $2,5$ бар и 50 л мин^{-1} , соответственно.

Результаты представлены в таблице 2. Таблица 3 содержит эксплуатационные показатели флотомашин Джеймсон и существующих машин перечистой флотации при питании с крайне низким содержанием. Гранулометрические характеристики флотационных концентратов представлены в таблице 4.

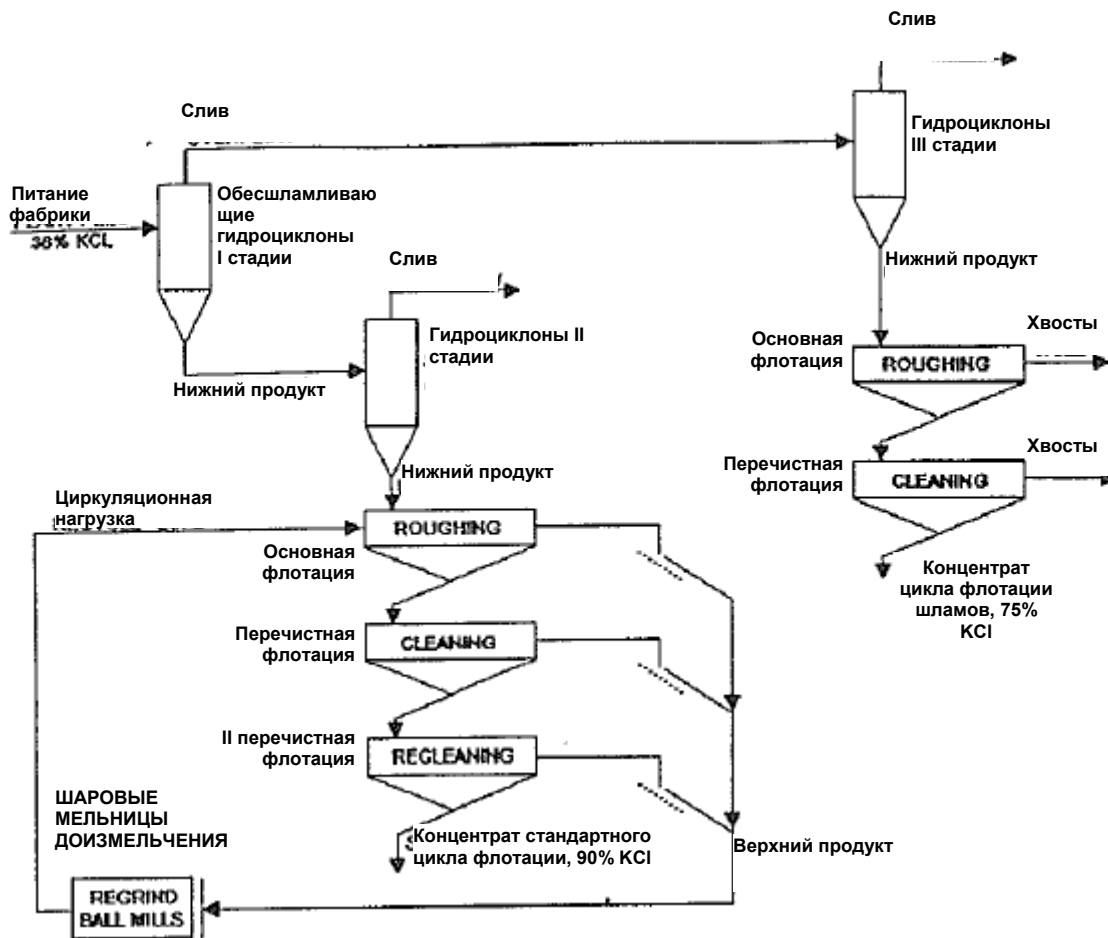


Рис. 1. Схема стандартного цикла флотации и цикла флотации шламов на предприятии Cleveland Potash, Ltd.

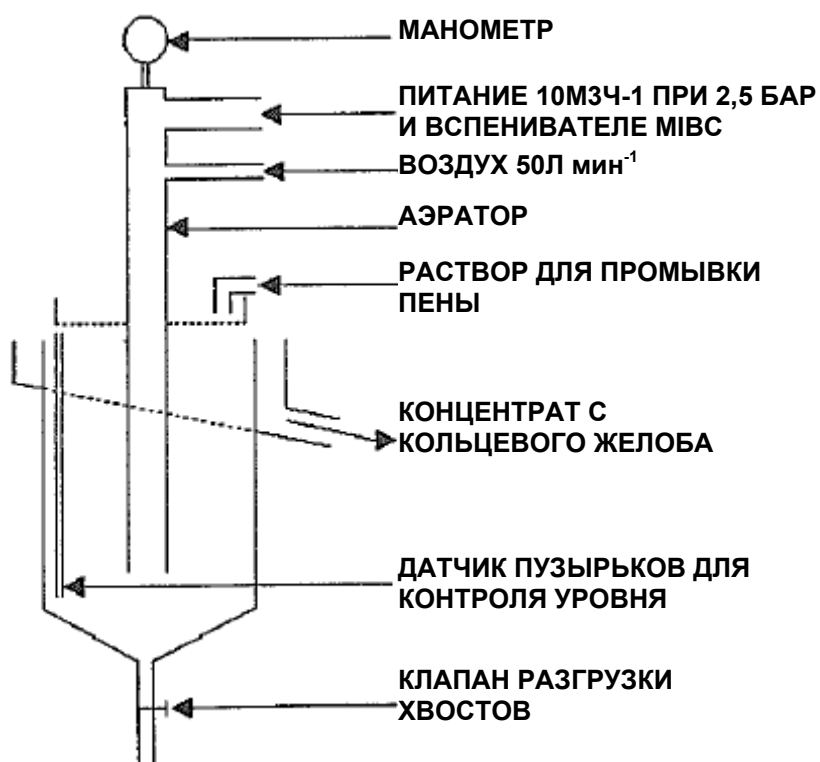


Рис 2.: Схематическая диаграмма Jameson Cell

Таблица 1. Характеристики тестируемых потоков

Крупность, мм	Концентрат основной флотации	Концентрат перечистной флотации	Концентрат второй перечистной флотации	Питание флотации шламов
Остаток на сите, % (по весу)				
+0,85	12,4	6,2	2,6	0,0
-0,85 + 0,60	14,3	15,4	14,6	0,3
-0,60 + 0,30	39,3	45,7	51,6	3,0
-0,30 + 0,10	24,6	24,8	26,7	34,6
(-0,10)	9,4	7,9	4,5	62,1
Твердая фракция, % (по весу)	32	33	38	18
Удельная плотность	1,41	1,42	1,45	1,33
KCl, % (по весу)	70-80	80-87	87-90	25-35

Флотация концентрата основной флотации

При исследованиях флотации концентрата основной флотации режим работы флотомашин был изменен, и глубина слоя пены была увеличена до 40 см. Расход воздуха и MIBC остались прежними. Отбор проб был организован так, чтобы сопоставить показатели извлечения во флотомашине Джеймсон с показателями всего цикла перераспределения и второй перераспределительной флотации (таблицы 5 и 6). На данном этапе была использована промывка пены (проходы 23, 24 и 27) для удаления механически выносимой в пенный слой пустой породы.

В проходах 11-21 тесты проводились при глубине слоя пены 30 см без промывки. Прочие эксплуатационные параметры оставались неизменными.

При флотации концентрата основной флотации был прослежен путь извлечения крупной фракции (+0,85 мм) (рис. 3 и 4).

Флотация питания флотации шламов

При флотации питания флотации шламов испытания проводились при глубине слоя пены 40 см без изменения других параметров. Разбавления питания не потребовалось, поскольку было очевидно, что давление на стороне питания и расход воздуха были достаточными. Результаты представлены в таблице 7.

Таблица 2. Эффективность флотомашин на концентрате перераспределительной флотации KCl

Проход	Дата	Флотомашин Джеймсон				Текущие машины второй перераспределительной флотации			
		Питание, % (по весу) KCl	Хвосты, % (по весу) KCl	Концентрат, % (по весу) KCl	Извлечение, %	Питание, % (по весу) KCl	Хвосты, % (по весу) KCl	Концентрат, % (по весу) KCl	Извлечение, %
1	29/04	75,4	34,7	91,2	87,0	75,4	44,3	89,0	82,1
2	04/05	80,0	22,5	88,1	96,5	80,0	48,1	91,5	84,1
3	05/05	65,5	20,1	89,2	89,5	65,5	34,0	88,1	78,3
4	06/05	75,8	44,3	90,6	81,3	75,8	48,9	89,5	78,2
5	06/05	70,0	32,6	88,6	84,5	70,0	49,2	89,2	66,3
6	06/05	73,7	38,8	88,5	84,3	73,7	48,5	90,6	73,6
7	06/05	68,3	31,9	88,0	83,6	68,3	37,5	90,3	77,1
8	13/05	72,0	18,8	87,4	94,1	72,0	27,0	88,0	90,2
Среднее		72,6	30,5	89,0	87,6	72,6	42,2	89,5	78,7

Таблица 3. Эффективность флотомашин на концентрате переречистой флотации с низким содержанием

Проход	Дата	Флотомашина Джеймсон				Текущие машины второй переречистой флотации			
		Питание, % (по весу) KCl	Хвосты, % (по весу) KCl	Концентрат, % (по весу) KCl	Извлечение, %	Питание, % (по весу) KCl	Хвосты, % (по весу) KCl	Концентрат, % (по весу) KCl	Извлечение, %
9	06/05	41,3	16,5	89,7	73,6	41,3	28,1	88,6	46,8
10	06/05	43,2	20,5	88,5	68,4	43,2	26,9	88,5	54,2
Среднее		42,3	18,5	89,1	71,0	42,3	27,5	88,6	50,5

Таблица 4. Гранулометрическая характеристика концентратов, полученных из флотомашины Джеймсон и установленных машин второй переречистой флотации

Номинал сита, мм	Остаток на сите, % (по весу)		KCl, % (по весу)		NaCl, % (по весу)		Нерастворимая фракция, % (по весу)	
	1	2	1	2	1	2	1	2
+0,85	30,4	5,7	90,8	92,7	8,0	6,8	1,2	0,5
-0,85 + 0,60	31,3	21,3	85,1	89,0	10,5	8,0	4,4	3,0
-0,60 + 0,30	27,4	41,9	86,3	91,6	12,3	8,0	1,4	0,4
-0,30 + 0,10	9,7	26,3	91,1	92,1	8,0	7,4	0,9	0,5
(-0,10)	1,2	4,8	71,2	79,7	3,4	6,4	25,4	13,9

1. Концентрат флотомашины Джеймсон

2. Концентрат имеющейся машины второй переречистой флотации

ПИТАНИЕ 11,4% ПО ВЕСУ

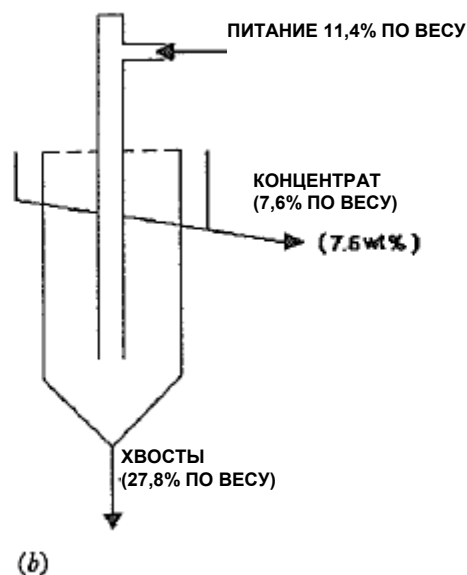


Рис. 3. Вовлечение медленно флотируемых частиц KCl +850 мкм с высоким содержанием в конечный концентрат при тестовом проходе 24: (a) цикл фабрики, (b) флотомашин Джеймсон. На рисунке указан материал, оставшийся на сите. Общее извлечение материала +850 мкм в концентрат в цикле фабрики и во флотомашине Джеймсон составило 14,75 и 53% (по весу), соответственно.

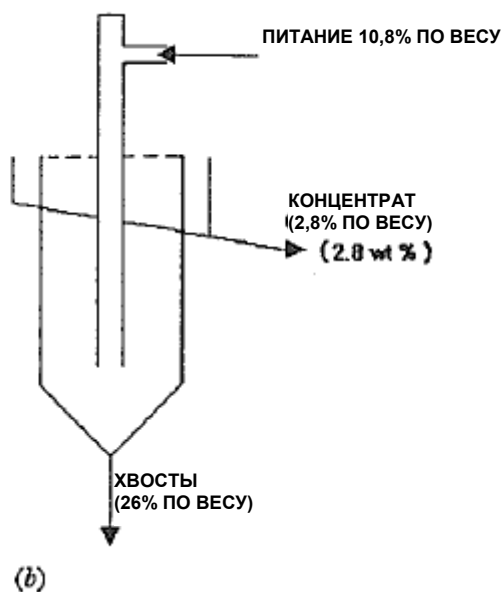
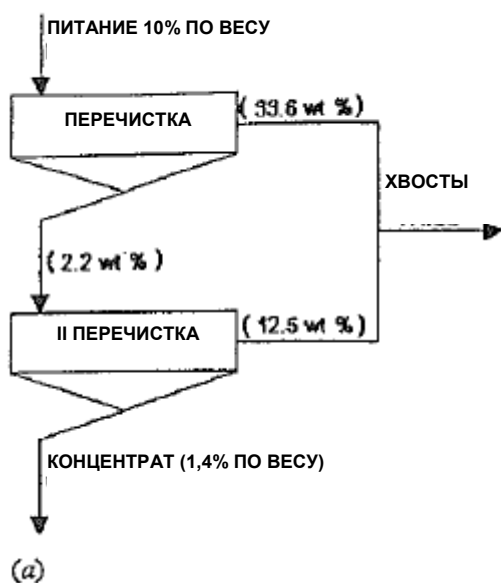


Рис. 4. Вовлечение медленно флотируемых частиц KCl +850 мкм с высоким содержанием в конечный концентрат при тестовом проходе 25: (a) цикл фабрики, (b) флотомашин Джеймсон. На рисунке указан материал, оставшийся на сите. Общее извлечение материала +850 мкм в концентрат в цикле фабрики и во флотомашине Джеймсон составило 8,74 и 17% (по весу), соответственно.

Анализ и выводы

Непосредственно после пуска в эксплуатацию для достижения максимальной эффективности флотомашины не потребовалось значительной корректировки металлургических параметров, таких как расход воздуха, расход вспенивателя, глубина слоя пены, уровень пульпы в аэраторе и промывка пены. Не потребовалось и сложных испытаний, связанных с анализом небольших пошаговых изменений в настройках флотомашины. Большая часть испытаний была направлена на разработку точных методик отбора проб и режима непрерывной круглосуточной эксплуатации при минимальном контроле.

В таблице 1 представлены характеристики исследованных потоков; содержание твердой фракции в пульпе было значительным на протяжении всех пилотных исследований. Все потоки, кроме питания флотации шламов, требовали разбавления питания флотомашины Джеймсон насыщенным раствором в пропорции 1:1. Совокупное объемное извлечение в цикле основной флотации CPL составило $500 \text{ м}^3 \text{ч}^{-1}$. Следовательно, при расходе $1000 \text{ м}^3 \text{ч}^{-1}$ потребовалась бы промышленная установка. Расчеты предварительного масштабирования показывают, что для замещения 28 машин перечистой и второй перечистой флотации Denver 30DR 2,8 м^3 потребуется две флотомшины диаметром 2,75 м.

Содержание твердой фракции в концентрате основной флотации составляет, как правило, 32% (по весу) и не делает пульпу слишком вязкой. Однако концентрат содержит значительное количество вовлеченного воздуха, который с трудом выходит из насоса питания флотомашины, что приводит к низкому нестабильному давлению на стороне питания менее 2,5 бар. Столь неблагоприятный режим эксплуатации приводит к низкой аспирации, а следовательно снижает эффективность флотации. Основная функция разбавления насыщенным раствором заключалась, таким образом, в удалении вовлеченного воздуха перед перекачиванием, а вызванное этим снижение вязкости не было значительным. Еще предстоит установить, можно ли подобрать иной метод, помимо дальнейшего разбавления раствором, для уменьшения потерь давления на стороне питания, чтобы сократить размеры и стоимость промышленной установки при увеличении производительности.

Флотация концентрата второй перечистой флотации

В настоящее время на предприятии CPL практически отсутствуют возможности для четвертой стадии флотации. Однако применение флотомашины Джеймсон позволило повысить содержание KCl в концентрате перечистой флотации с 88,5% (по весу) до 91,2% (по весу) при извлечении 94,7% KCl. Это краткое испытание позволило определить обоснованный исходный уровень и точку отсчета для дальнейших тестов.

Флотация концентрата перечистой флотации

В таблице 2 сравниваются показатели эффективности флотомашины Джеймсон и машины второй перечистой флотации CPL при одинаковом питании. Очевидно, что флотомашина Джеймсон обеспечила более высокое содержание и извлечение KCl (89% и 87,6% по весу, соответственно) по сравнению с машинами второй перечистой флотации (89,5% и 78,8% по весу, соответственно). Повышенное извлечение несомненно связано с переходом в концентрат крупных частиц с высоким содержанием в количестве, превышающем аналогичный показатель в машине второй перечистой флотации (таблица 4).

Таблица 5. Эффективность флотомашин на концентрате основной флотации

Проход	Дата	Флотомашина Джеймсон (глубина слоя пены 30 см)				Имеющиеся машины второй перечистой флотации			
		Питание, % (по весу) КСІ	Хвосты, % (по весу) КСІ	Концентрат, % (по весу) КСІ	Извлечение, %	Питание, % (по весу) КСІ	Хвосты, % (по весу) КСІ	Концентрат, % (по весу) КСІ	Извлечение, %
11	18/05	67,1	24,0	88,5	88,1	67,1	33,6	79,4	86,6
12	19/05	63,9	32,8	88,5	77,3	63,9	27,7	85,8	83,7
13	19/05	69,9	29,4	90,0	86,0	69,9	32,8	87,9	84,7
14	19/05	76,7	37,4	90,0	87,7	76,7	33,9	87,4	91,2
15	19/05	74,6	36,6	87,4	87,6	74,6	40,4	86,9	85,7
16	20/05	65,5	31,1	87,4	81,5	65,5	34,5	86,3	78,8
17	20/05	61,7	30,4	88,5	77,3	61,7	28,9	83,9	81,1
18	20/05	68,3	29,6	88,5	85,1	68,3	33,8	84,4	84,2
19	20/05	71,2	36,4	89,0	82,7	71,2	40,9	85,8	81,3
20	20/05	66,4	33,8	90,1	78,6	66,4	36,4	86,9	77,7
21	20/05	65,6	40,5	91,2	68,8	65,6	33,8	86,3	79,7
Среднее		68,3	32,9	89,0	81,9	68,3	34,2	85,5	83,2

Таблица 6. Эффективность флотомашин на концентрате основной флотации

Проход	Дата	Флотомашина Джеймсон (глубина слоя пены 40 см)				Имеющиеся машины перечистой и второй перечистой флотации			
		Питание, % (по весу) КСІ	Хвосты, % (по весу) КСІ	Концентрат, % (по весу) КСІ	Извлечение, %	Питание, % (по весу) КСІ	Хвосты, % (по весу) КСІ	Концентрат, % (по весу) КСІ	Извлечение, %
22	11/06	78,8	47,0	90,0	84,5	78,8	54,5	90,2	78,0
23*	15/06	80,0	52,9	90,2	82,2	80,0	63,0	92,7	67,0
24*	15/06	79,9	48,1	91,7	83,7	79,9	53,0	91,8	79,6
25	16/06	74,7	47,3	89,6	77,7	74,7	50,7	89,0	74,6
26	16/06	79,4	46,5	92,8	83,0	79,4	47,2	93,9	74,0
27*	24/06	77,5	52,6	91,1	76,0	77,5	53,5	91,1	75,0

Проход	Дата	Флотомашина Джеймсон (глубина слоя пены 40 см)				Имеющиеся машины перечистой и второй перечистой флотации			
		Питание, % (по весу) KCl	Хвосты, % (по весу) KCl	Концентрат, % (по весу) KCl	Извлечение, %	Питание, % (по весу) KCl	Хвосты, % (по весу) KCl	Концентрат, % (по весу) KCl	Извлечение, %
Среднее		78,4	49,1	90,9	81,2	78,4	53,6	91,4	74,7

* Промывка пены насыщенным раствором для снижения механического уноса пустой породы

Таблица 7. Эффективность флотомашин на питании флотации шламов

Проход	Дата	Флотомашина Джеймсон				Имеющиеся машины второй перечистой флотации			
		Питание, % (по весу) KCl	Хвосты, % (по весу) KCl	Концентрат, % (по весу) KCl	Извлечение, %	Питание, % (по весу) KCl	Хвосты, % (по весу) KCl	Концентрат, % (по весу) KCl	Извлечение, %
28	07/07	27,8	4,9	77,4	87,9	27,8	8,5	78,4	77,9
29	08/07	18,4	6,0	75,9	73,2	18,4	6,5	77,9	70,6
30	09/07	23,3	4,6	71,8	85,8	23,3	6,6	82,3	77,9
31	12/07	21,8	4,9	70,0	83,4	21,8	4,3	78,5	84,9
Среднее		22,8	5,1	73,8	82,6	22,8	6,5	79,3	77,8

При отборе проб, данные которого представлены в таблице 4, было установлено, что флотомашина Джеймсон извлекает в концентрат 30,4% (по весу) фракции +0,85 мм, в то время как установленная на фабрике машина второй перечистой флотации извлекает только 5,7% той же фракции. Повышенная эффективность улучшает отделение пустой породы, центрифугирование и сушку концентрата, общее по фабрике извлечение и уменьшает объем материала, поступающего на вторичное измельчение.

Данные таблицы 3 характеризуют эффективность флотомашин Джеймсон при очень низком содержании питания. Очевидно, что флотомашина способна работать с высокой эффективностью в экстремальных эксплуатационных условиях. Флотомашина Джеймсон действительно обеспечивает намного более высокое извлечение, что позволяет рассчитывать на значительное сокращение материала, возвращаемого на основную флотацию при переработке на фабрике материала с низким содержанием.

Флотация концентрата основной флотации

При флотации концентрата основной флотации были выполнены две отдельные программы отбора проб, результаты которых представлены в таблицах 5 и 6. В таблице 5 сопоставляются показатели эффективности флотомашин Джеймсон и установленных на фабрике машин перечистой флотации при одинаковом содержании питания. Средние показатели свидетельствуют о том, что флотомашин Джеймсон обеспечила содержание KCl 89% (по весу) при извлечении 81,9%. Машины перечистой флотации обеспечили содержание KCl 85,5% (по весу) при извлечении 83,2%. Более низкое извлечение во флотомашине Джеймсон связано с высокой границей пена-пульпа. Основное преимущество флотомашин Джеймсон заключается в удобстве корректировки границы пульпа-пена при изменении содержания в питании, которое отличается заметным непостоянством.

В таблице 6 представлены результаты более детального отбора проб, проведенного для прямого сопоставления эффективности флотомашин Джеймсон с эффективностью всего установленного на предприятии цикла перечистой и второй перечистой флотации (показан на рис. 3 и 4). Средние значения по результатам отбора проб (таблица 6) наглядно указывают на разницу в эффективности между флотомашин Джеймсон и установленными машинами перечистой и второй перечистой флотации. Флотомашин Джеймсон обеспечила приемлемое содержание в конечном концентрате, сопоставимое с показателями машин второй перечистой флотации, при извлечении 81,2% KCl по сравнению с 74,7% в цикле, показанном на рис. 3 и 4. Повышенное извлечение вызвано тем, что крупная фракция поступает в концентрат, а не в хвосты.

В трех случаях слой пены промывался насыщенным раствором (проходы 23, 24 и 27), но это не принесло очевидных преимуществ. Этого следовало ожидать, учитывая природу пены на предприятии CPL, которая не склонна к механическому уносу пустой породы.

Флотация питания флотации шламов

Из таблицы 7, содержащей результаты переработки питания флотации шламов, наглядно следуют два отношения между содержанием и извлечением. Извлечение во флотомашине Джеймсон, составляющее 82,6%, позволяет получать дополнительно 1 т ч^{-1} поташа, что соответствует дополнительному доходу в размере 518 тысяч фунтов в год.

Предположение, что аналогичного извлечения можно добиться на существующих флотомашин за счет ускоренного прохождения концентрата, в корне ошибочно, учитывая особенности переработки больших объемных расходов пульпы при низкой плотности. При этом неизбежно страдает конечный концентрат шламов.

Компания CPL приняла решение приобрести промышленную установку для переработки питания флотации шламов. Установка будет также использоваться для переработки концентрата основной флотации, чтобы в дальнейшем можно было принять решение о закупке дополнительных флотомашин Джеймсон для полной замены цикла перечистой и второй перечистой флотации. Флотомашин будет иметь диаметр 3,25 м и перерабатывать $325 \text{ м}^3 \text{ ч}^{-1}$ пульпы. Фактически она заменит две батареи машин основной флотации и одну батарею машин перечистой флотации, т.е. всего 16 флотомашин объемом по $2,8 \text{ м}^3$.

Ожидаемая экономия

Энергопотребление двигателей установленных флотомашин является одной из очевидных возможностей для экономии; расходы на электроэнергию могут быть снижены как минимум на 21 тысячу фунтов в год. Расходы только на запасные части, необходимые для обслуживания 28 флотомашин Denver, составляют почти 20 тысяч фунтов в год (исключая стоимость самих работ). Расход топлива на сушку готового продукта также может быть сокращен с получением экономии порядка 100 тысяч фунтов. Эти оценки сделаны из расчета замены 28 машин перечистой и второй перечистой флотации объемом 2,8 м³ каждая двумя флотомашинами Джеймсон. Срок окупаемости составит около одного года. Необходимо отметить, что если бы флотомшины были заменены традиционными установками с перемешиванием, экономия, как и срок окупаемости, были бы равны нулю из-за отсутствия технологических преимуществ.

Очевидно, что флотация во флотомашине Джеймсон позволяет не только сократить капитальные и эксплуатационные затраты, но и повысить технологические показатели.

Об авторах

М. Дж. Бернс (член) является инженером-разработчиком в компании Cleveland Potash. Ранее работал в ЮАР в качестве металлурга на предприятии компании Johannesburg Consolidated Industries, где приобрел опыт переработки драгоценных металлов и полиметаллов. Окончил Университет Лидса в Англии и имеет степени бакалавра технических наук (переработка минерального сырья) и магистра наук (инженерная керамика).

Адрес: Cleveland Potash, Ltd., Boulby Mine, Saltburn, Cleveland TS13 4UZ, England.

Дж. Коутс уже шесть лет является техником-металлургом компании Cleveland Potash. Имеет дипломы о высшем образовании в области гражданского строительства, предпринимательства и финансов.

Л. Барнард недавно заняла должность техника-металлурга в компании Cleveland Potash, а до этого работала лаборантом в Национальной физической лаборатории, Теддингтон, гр. Мидлсекс. Окончила Королевский колледж в Лондоне со степенью бакалавра технических наук (материаловедение).