

# **Модернизация обогатительной фабрики Телфер - установка дополнительных мощностей на перечистной флотации и доизмельчении медных и пиритных концентратов**

Д.Р. Симэн<sup>1</sup>, Ф. Бернс<sup>2</sup>, Б. Адамсон<sup>3</sup>, Б.А. Симэн<sup>4</sup>, П. Мэнтон<sup>5</sup>

## **Автореферат**

Обогатительная фабрика Телфер, расположенная в Большой Песчаной пустыне, шт. Западная Австралия, перерабатывает на двух технологических линиях золото-медную руду, поступающую в настоящее время из одного подземного рудника и двух карьеров, с разным минералогическим составом. Цикл флотации в составе каждой из линий спроектирован с возможностью эксплуатации в нескольких режимах в зависимости от минералогии питания. Большая часть руды, добываемой на фабрике Телфер, перерабатывается в последовательном режиме, при котором содержащие медь минералы флотируются с получением коммерческого медного концентрата, после которой следует флотация золотосодержащего пиритного концентрата, который перерабатывается на гидрометаллургическим способом (с использованием цикла CIL). Золото на фабрике извлекают в форме гравитационного продукта в цикле первичного измельчения в медный концентрат и, в меньшей степени, в цикле CIL.

С момента повторного пуска в 2004 году после установки новой обогатительной фабрики предприятие Телфер испытывает проблемы, связанные с низким содержанием меди в концентрате, отчасти вследствие избыточного вовлечения несульфидных безрудных минералов в цикл флотации меди, а в последнее время вследствие образования композитных частиц меди при переработке руды из соседнего рудника, которая ранее не поступала на новую обогатительную фабрику Телфер. Извлечение золота в цикле CIL также ниже обычного для отрасли.

В данной статье рассматриваются последние изменения, внесенные в технологический цикл, с целью повышения эффективности. Переоборудование цикла включало установку следующих единиц оборудования: две мельницы IsaMill™ для ультрамонного измельчения (одна из них в медном цикле, другая - в пиритном цикле), две флотомашины Джеймсон для повышения эффективности сепарации тонкой пустой породы и батарея из пяти установок Outotec TC30 для извлечения меди и золота из потока доизмельченного пирита. Оборудование было закуплено непосредственно у производителей; проектные и монтажные работы по переоборудованию и модернизации предприятия были поручены инженерной компании.

## **Введение**

Золото- и медедобывающее предприятие Телфер расположено в регионе Пилбара Западной Австралии. Открытая добыча руды (рудник Майн Доум) была возобновлена в 2003 году; затем в середине 2006 года была начата подземная добыча (рудник Телфер Дипс). Медь в руде находится в разных формах: от преимущественно халькоцита в карьере до

<sup>1</sup> член AusIMM, главный металлург, Newcrest Mining Limited, 193 Great Eastern Highway, Belmont WA 6104. Эл. почта: [david.seaman@newcrest.com.au](mailto:david.seaman@newcrest.com.au)

<sup>2</sup> кандидат в члены AusIMM, металлург завода, Newcrest Mining Limited. Эл. почта: [fraser.burns@newcrest.com.au](mailto:fraser.burns@newcrest.com.au)

<sup>3</sup> металлург завода, Newcrest Mining Limited. Эл. почта: [brooke.adamson@newcrest.com.au](mailto:brooke.adamson@newcrest.com.au)

<sup>4</sup> член AusIMM, старший металлург-консультант, Newcrest Mining Limited, 193 Great Eastern Highway, Belmont WA 6104. Эл. почта: [brigitte.seaman@newcrest.com.au](mailto:brigitte.seaman@newcrest.com.au)

<sup>5</sup> руководитель проекта модернизации фабрики Телфер, Newcrest Mining Limited, 400 Georges Street, Brisbane Qld 4000. Эл. почта: [peter.manton@newcrest.com.au](mailto:peter.manton@newcrest.com.au)

преимущественно халькопирита в подземном руднике. В обоих случаях золото присутствует в форме свободного золота и гранул золота, заключенных в сульфиде меди и пирите. Обогатительная фабрика имеет две параллельные технологические линии (линия 1 и линия 2), в настоящее время работающие с производительностью 24 млн. т в год, из которых примерно 6 млн. т поступает из подземного рудника. На линию 1 поступает смесь руды открытой и подземной добычи, а на линию 2 поступает исключительно руда из карьера. Более подробная геологическая и минералогическая характеристика рудника, исходные критерии проектирования обогатительной фабрики и методика эксплуатации содержатся в ранее опубликованных работах Goulsbra et al. (2003) и Benson et al. (2007).

На обеих технологических линиях для обогащения руды используются различные схемы. Основной схемой является последовательная флотация, при которой медьсодержащие минералы извлекаются в коммерческий медный концентрат с последующей реактивацией и флотацией пирита, выщелачиваемого цианидом с целью извлечения золота. Большая часть свободного золота, не извлеченного на гравитационной стадии при измельчении, извлекается в медный концентрат.

В последнее время Телфер также перерабатывает руды из соседнего месторождения Вест Доум. Если руда из Майн Доум, основного источника руды на предприятии Телфер, как правило, поддается хорошему высвобождению после измельчения до требуемого номинального класса крупности  $P_{80}$  120 мкм, то руда месторождения Вест Доум имеет существенно другую минералогию. В частности, руда Вест Доум имеет значительно более высокое содержание серы, а минералы меди, как правило, обрамляют или вкраплены в пирит в форме жил.

В Zheng et al. (2010) сообщается о первоначальных технологических изменениях на предприятии Телфер для решения проблемы перегрузки цикла перечистки меди на линии 1, а также об основных аспектах переоборудования технологического цикла, проведенной на предприятии. В настоящей статье описаны три основных изменения на обогатительной фабрике за последние 12 месяцев, которые были внесены, чтобы повысить технологические показатели фабрики. Изменения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Переоборудование технологического цикла на предприятии Телфер с учетом различных факторов, влияющих на эффективность производства

Фактор/возможность	Переоборудование фабрики
Высокое содержание высвобожденной несульфидной (не представляющей ценности) пустой породы в медном концентрате, препятствующее повышенному извлечению золотосодержащего пирита и золотосодержащих композитных частиц	Снятие головки - две флотомашины Джеймсон (E3432/8) в составе цикла перечистки, установленные перед существующим двухстадийным циклом перечистки
Низкое содержание медного концентрата при переработке руды Вест Доум - из-за худшего высвобождения медных сульфидов по сравнению с рудой из основного месторождения Майн Доум	Доизмельчение медной руды - мельница доизмельчения медной руды и цикл предварительной классификации при доизмельчении медного концентрата основной флотации (IsaMill M3000 - 1,1 мВт)

Фактор/возможность	Переоборудование фабрики
Пониженное извлечение и высокая эксплуатационная себестоимость извлечения золота в цикле выщелачивания пирита (CIL)	Доизмельчение и повторная перечистка пирита - мельница доизмельчения пирита и машины перечистной флотации для высвобождения и извлечения золота и меди из пиритного концентрата перед цианированием (IsaMill M 5000 - 1,5 МВт и 5 машин Outotec емкостью 30 куб.м со статорами с высоким сдвиговым усилием)

На рис. 1 и 2 показана технологическая схема Телфер до и после переоборудования, описанного в настоящей статье.

На момент написания настоящей статьи первая очередь переоборудования (установка флотомашин Джеймсон для скальпирования перечистной флотации) была завершена и сдана в эксплуатацию, а последующие два очереди близились к завершению, и их пуск ожидался в течение нескольких месяцев после завершения настоящей статьи. На рис. 3 представлена трехмерная модель размещения основного оборудования после технологического переоборудования. Оборудование было сосредоточено на одном участке из соображений удобства обслуживания и сведения к минимуму затрат и вмешательства в работу предприятия в ходе монтажных и пусконаладочных работ. Мельницы доизмельчения установлены на общей платформе, оборудованной порталным краном грузоподъемностью 10 т для нужд техобслуживания.

Основное оборудование было закуплено компанией Newcrest Mining непосредственно у производителей, чтобы сократить сроки монтажа и разбить капитальные затраты на этапы. Разработка технологии и основные проектные расчеты были выполнены специалистами Newcrest Mining (авторами настоящей статьи). Монтаж оборудования был поручен на основании договора EPC (проектирование-закупки-строительство) с фиксированной ценой сторонней инженерной компании (GR Engineering Services Limited). Xstrata Technology поставила комплекс оборудования, состоящий из мельницы доизмельчения пирита (мельница доизмельчения медной руды была приобретена не новой, но не бывшей в эксплуатации у стороннего поставщика), платформы для установки обеих мельниц, питающих и разгрузочных бункеров, системы подачи среды, сопутствующего оборудования и металлоконструкций. Для доизмельчения была выбрана технология IsaMill™ благодаря ее проверенной энергоэффективности, а также инертной среде, препятствующей пассивации поверхностей сульфидов (Pease et al., 2006). В конфигурации мельниц IsaMill также были использованы некоторые из усовершенствований, предложенных в (Rule, de Waal, 2011). Компания Outotec поставила для цикла доизмельчения пирита флотомашины (5 машин OT30), оборудованные механизмом флотации Outotec (Coleman, Rinne, 2011), а также статорами с высоким сдвиговым усилием (Bilney, MacKinnon, Kok, 2006), чтобы создать оптимальные условия флотации тонкой фракции.

Срок выполнения строительно-монтажных работ на объекте составит примерно 12 месяцев к моменту завершения всех трех очередей с учетом того, что заказы на поставку оборудования были размещены примерно за шесть месяцев до начала работ. Бюджет проекта переоборудования технологического цикла был одобрен в июле 2011 года, а завершение пусконаладки всего оборудования ожидается к середине августа 2012 года.

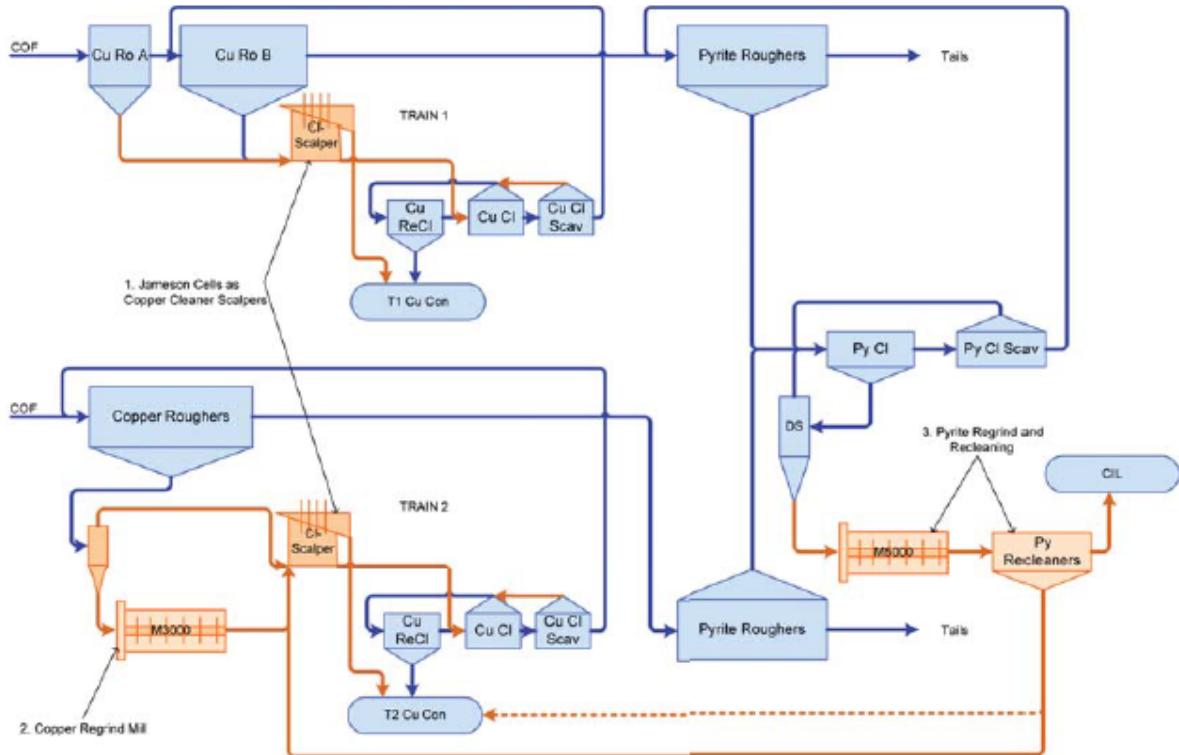


Рис. 1. Технологическая схема предприятия Телфер до переоборудования, описанного в настоящей статье (Примечание: цикл измельчения с гравитационным извлечением и скоростной флотацией не показан)

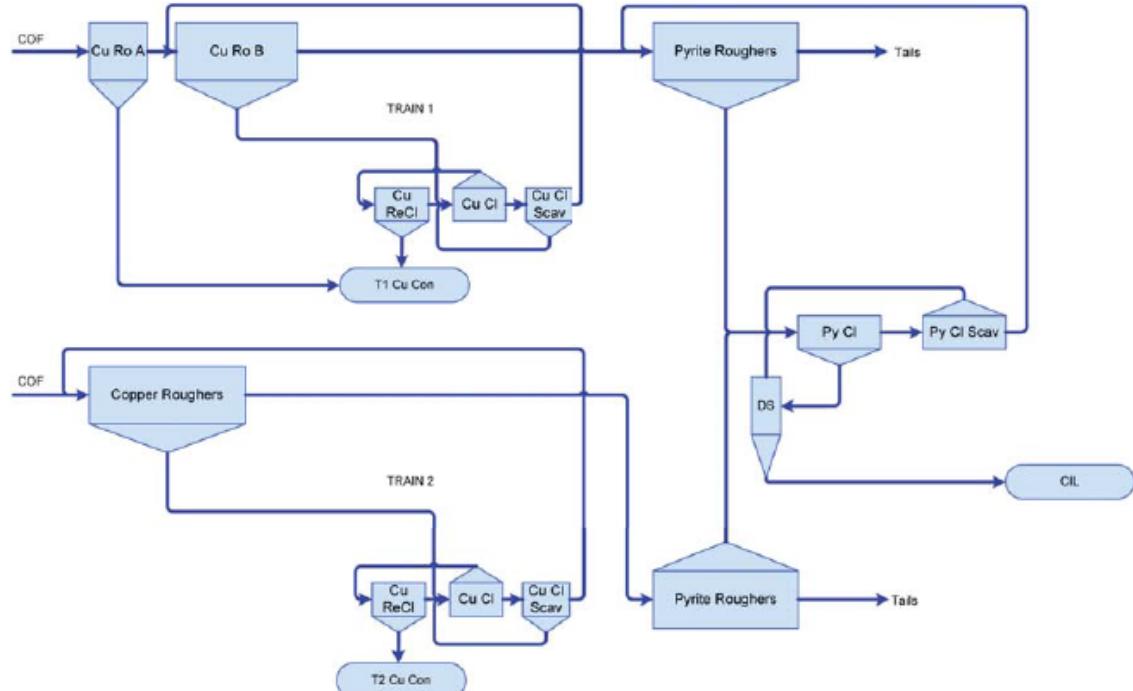


Рис. 2. Технологическая схема предприятия Телфер после переоборудования, описанного в настоящей статье; изменения выделены оранжевым цветом (Примечание: цикл измельчения с гравитационным извлечением и скоростной флотацией не показан)

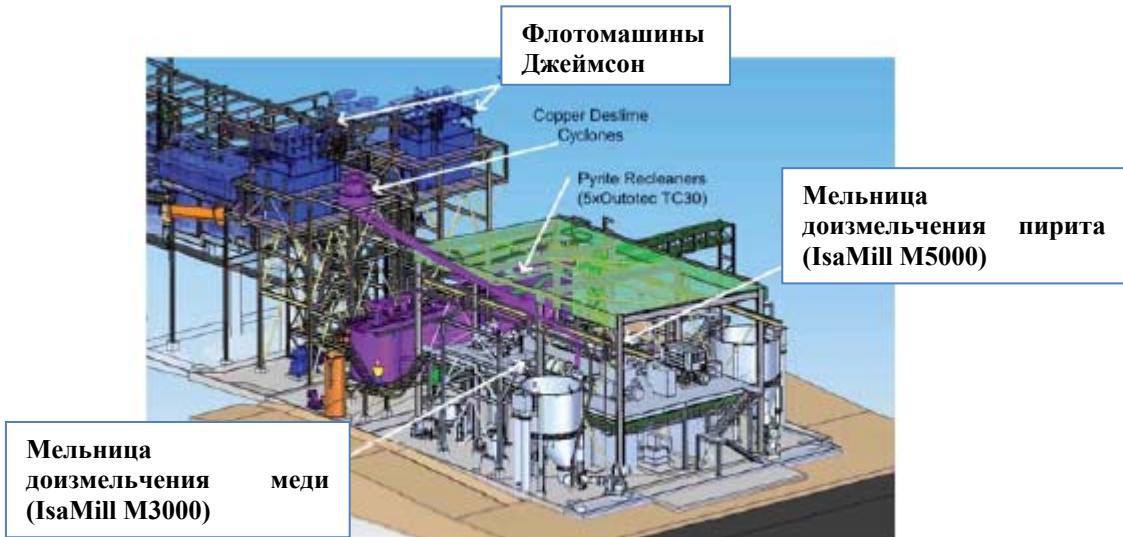


Рис. 3. Модель размещения оборудования на предприятии Телфер после переоборудования

### Снятие головки перечистной флотации

На основании анализа исторических данных по медному концентрату в Seaman, Manton, Griffin (2011) сделан вывод, что большая доля высвобожденной несульфидной нефлоторуемой пустой породы извлекалась в медный концентрат посредством механического выноса.

В Zweng, Crawford, Manton (2009) содержится подробная информация о переоборудовании линии 1, выполненном в 2009 году с целью сепарации пустой породы и устранения узкого места в цикле перечистки. Хотя результаты этого переоборудования были положительны, потребовалось и было выполнено дальнейшее переоборудование, описанное в Seaman, Manton, Griffin (2011).

Новые флотомашины Джеймсон, установленные для снятия головки перечистной флотации, были пущены в эксплуатацию в ноябре 2011 года. Каждая из флотомашин была установлена так, чтобы разгрузка хвостов и концентрата осуществлялась самотеком. Для этого флотомашины были установлены на металлическую платформу высотой 15 м над уровнем поверхности, а насосы рециркуляции были установлены на уровне поверхности для удобства обслуживания. Дополнительные затраты на подъем платформы компенсируются сокращением затрат на эксплуатацию и обслуживание за счет отсутствия необходимости в установке насосов для хвостов и концентрата и бункеров. Каждая из флотомашин оборудована восемью аэраторами и работает от насоса Warman 10/8 мощностью 75 кВт с производительностью с учетом рециркуляции примерно 700 куб.м/ч. Производительность по свежему питанию каждой флотомашине Джеймсон составляет около 175-350 куб.м/ч (или примерно 20-60 т/ч по твердому). Система промывочной воды рассчитана на расход до 100 куб.м/ч на флотомашину.

Флотомашина Джеймсон, описанная в Evans, Atkinson, Jameson (1995), является высокоэффективной флотомашиной, более компактна по сравнению с традиционными механическими флотомашинами и позволяет эффективно использовать промывку пены для лучшей сепарации пустой породы. Схема флотомашины Джеймсон последней модели представлена в Young et al. (2006).

На рис. 4 показана фотография установки. Работы по данной очереди проекта переоборудования предприятия Телфер были начаты в октябре 2010 года, в мае 2011 года было заказано основное оборудование, а в ноябре 2011 года флотомашины были пущены в эксплуатацию.



Рис. 4. Фотография флотомашин Джеймсон (скальпирование перед перечисткой) на обогатительной фабрике Телфер

### Эффективность цикла скальпирования перечистки

Преимущество установки флотомашин Джеймсон заключается в сепарации несульфидной пустой породы, что позволяет извлекать медленно флотируемые ценные минералы (как композитную, так и высвобожденную тонкую фракцию), а также замещать высвобожденную несульфидную пустую породу золотосодержащим пиритом. В ходе разработки проекта была проведена серия флотационных тестов, и полученные кривые селективности были использованы в модели флотации, прогнозирующей конечную эффективность установки (Seaman, Manton, Griffin, 2011). Предполагалось, что во флотомашинах Джеймсон среднее извлечение меди составит не менее 50%.

На рис. 5 показана селективность, полученная при выполнении серии флотационных тестов, относительно фактических эксплуатационных показателей установки, полученных при опробовании и собранных за четыре месяца после пуска флотомашин Джеймсон.

На рис. 5 видно, что фактические показатели флотомашин Джеймсон достаточно хорошо соответствуют модели в технологической линии 1, в то время как линия 2 имеет более низкую эффективность. Кроме того, в большинстве случаев показатель постадиального извлечения во флотомашинах значительно превышает прогнозный показатель 50%.

Из эксплуатационных данных также следует, что при более высоком извлечении металла (более 80%) флотомашины Джеймсон теряют селективность. Поэтому предприятие Телфер контролирует и поддерживает постадиальное извлечение металла на уровне ниже 80%.

До установки флотомашин Джеймсон машины второй перечистной флотации меди были перегружены, вплоть до перелива пены в некоторых случаях (см. рис. 6). Эта проблема была устранена установкой флотомашин Джеймсон, поскольку теперь в механические флотомашины поступает намного меньше флотируемого материала.

Флотомашины Джеймсон показали себя простыми в эксплуатации и не требующими значительного внимания со стороны операторов при изменении условий эксплуатации. Из-за отложений в предшествующих насосах и емкостях во флотомашинах нередко забиваются аэраторы.

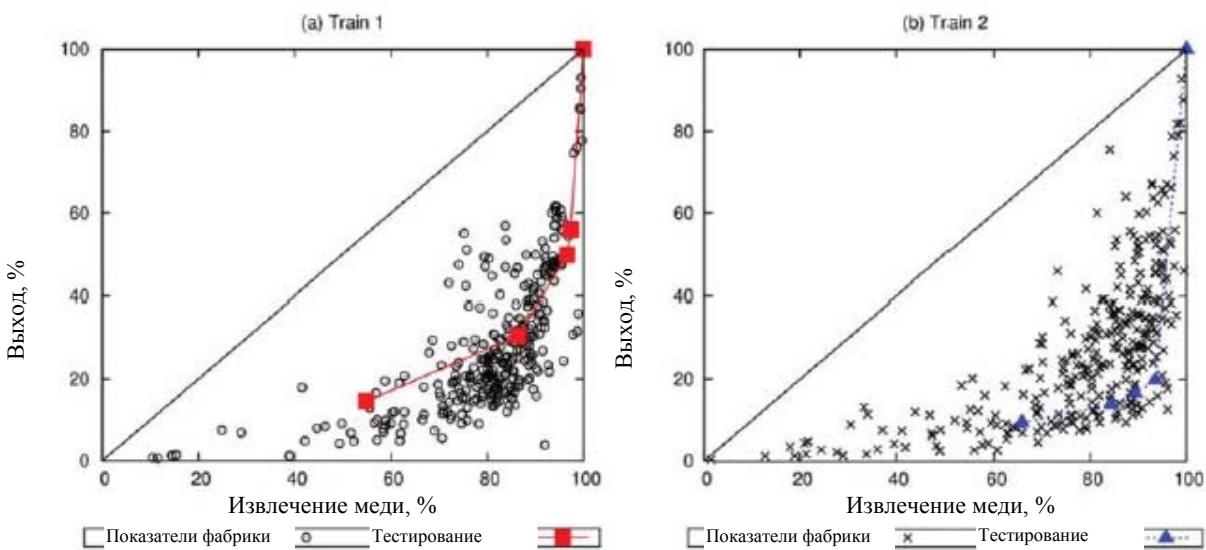


Рис. 5. Выход и селективность меди на (А) линии 1 и (В) линии 2. Сопоставление данных точечных проб (ноябрь 2011 - март 2012) с данными флотационных испытаний, проведенных при разработке проекта



Рис. 6. Фотография перегруженных машин вторичной перечистной флотации технологической линии 2 до установки флотомашин Джеймсон

#### Количественный анализ по классам крупности

В отношении цикла перечистки технологической линии 2 было предпринято изучение количественного анализа по классам крупности и составлен масс-баланс, чтобы установить эффективность цикла в зависимости от класса крупности.

На рис. 7 показано извлечение различных элементов в зависимости от крупности во флотомашине Джеймсон, а также содержание пустой породы в зависимости от класса крупности в концентратах флотомашины Джеймсон (скальпирование перечистки) и вторичной перечистки (традиционные флотомашины).

Можно заметить, что показатели извлечения ценных элементов (золота и меди) во флотомашине Джеймсон особенно высоки во всем диапазоне крупностей с небольшим

снижением на отрезках максимальной и минимальной крупности. Содержание несульфидной пустой породы (НПП) в зависимости от крупности указывает на то, что флотомашина Джеймсон сепарирует НПП намного лучше механической флотомашины благодаря использованию в первой промывочной воды. Испытания с подачей промывочной воды в механические флотомашины показали, что возможно улучшение показателей сепарации НПП. Постоянная схема подачи промывочной воды в механические флотомашины будет, как ожидается, реализована в течение нескольких месяцев после написания настоящей статьи.

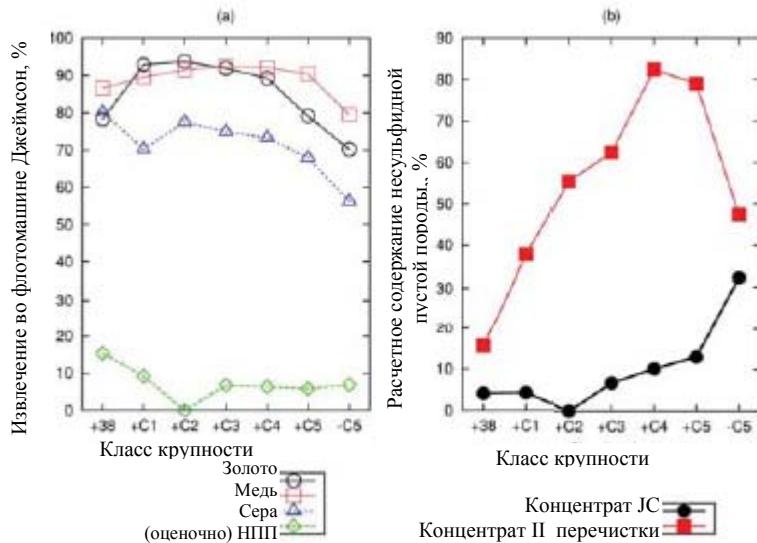


Рис. 7. Зависимость между крупностью и извлечением во флотомашине Джеймсон и расчетное содержание несульфидной пустой породы (НПП) по классам крупности в концентрате флотомашины Джеймсон и после вторичной перечистной флотации в традиционных флотомашинах в зависимости от фракции грохота/классификатора циклонного типа (НПП по данным количественного анализа)

### Технологическое исследование блока перечистной флотации

Технологические исследования были выполнены в течение двух месяцев перед пуском флотомашин Джеймсон. На основе собранных данных был выполнен масс-баланс. Полученные показатели эффективности перечистной флотации представлены ниже в таблице 2.

Таблица 2. Результаты исследования цикла перечистной флотации линии 1 (T1) и линии 2 (T2)<sup>a</sup> до установки флотомашин Джеймсон

Извлечение в цикле перечистной флотации					
	Выход	Cu	Au	Fe	S
	11,3	76,2	86,8	27,2	31,3
	31,9	90,3	89,0	50,7	46,7
	21,7	89,4	88,9	62,3	69,4
	24,1	93,2	94,6	57,6	74,1
Среднее, T1	22,2	87,3	89,8	49,4	55,4

Извлечение в цикле перечистной флотации					
	Выход	Cu	Au	Fe	S
	26,7	50,0	80,1	51,5	61,6
	29,5	88,1	94,2	74,8	85,2
Среднее, T2	28,1	69,0	87,2	63,1	73,4

<sup>a</sup>. Блок цикла перечистной флотации представлен медным концентратом основной флотации в качестве питания, медным концентратом второй перечистной флотации и хвостами скальпирования перечистки меди в качестве продукта.

Можно заметить, что до установки флотомашин Джеймсон эффективность блока перечистной флотации была непостоянной и в среднем составляла менее 90% на обеих технологических линиях как для меди, так и для золота. Пониженное извлечение железа и серы является следствием намеренной сепарации пирита в цикле перечистной флотации. В таблице 3 представлены обобщенные данные по извлечению в блоке перечистной флотации после установки флотомашин Джеймсон. Необходимо обратить внимание на то, что на технологической линии 1 поток концентрата основной флотации А теперь проходит через блок перечистной флотации, хотя ранее этот поток направлялся в обход этого блока.

Таблица 3. Результаты исследования цикла перечистной флотации после установки флотомашин Джеймсон

Извлечение в цикле перечистной флотации (после флотомашин Джеймсон)					
	Выход	Cu	Au	Fe	S
	89,5	99,5	99,6	98,2	95,4
	43,6	92,4	93,4	45,7	47,3
	25,1	95,2	95,3	55,0	57,3
	11,0	87,4		27,1	37,9
	26,7	95,3		47,2	55,7
	33,2	97,5		56,5	65,6
	20,8	95,3		37,5	48,0
	57,5	99,4		84,0	91,5
	64,0	99,6		84,2	93,0
Среднее, T1	52,7	95,7	96,1	66,3	66,7
	68,6	94,3	97,2	82,6	90,0
	25,5	97,4	98,0	67,9	83,8

Извлечение в цикле перечистной флотации (после флотомашин Джеймсон)					
	Выход	Cu	Au	Fe	S
Среднее, T2	47,0	95,8	97,6	75,3	86,9

Из сравнения показателей эффективности блока перечистной флотации до и после установки флотомашин Джеймсон следует, что общая эффективность блока значительно повысилась, а извлечение золота и меди в цикле перечистной флотации превысило 95%.

На более эффективную работу блока перечистной флотации также указывает содержание меди и золота в хвостах скальпирования перечистной флотации, которое значительно снизилось в обеих технологических линиях (таблица 4).

Таблица 4. Содержание меди и золота в хвостах скальпирования перечистки до и после установки флотомашин Джеймсон (средний дневной совокупный показатель за два месяца до и после запуска)

	Содержание меди в хвостах скальпирования перечистки, %		Содержание золота в хвостах скальпирования перечистки, г/т	
	Линия 1	Линия 2	Линия 1	Линия 2
До	0,46	0,46	2,00	2,79
После	0,39	0,31	1,78	1,38
Значимость, %	84	100	75	100

Эксплуатационные данные за два месяца до и после установки флотомашин Джеймсон был подвергнуты анализу с целью определить, насколько повысилось извлечение в цикле после установки флотомашин. После внесения поправки на известные факторы, влиявшие на извлечение в течение этого времени (содержание в питании, минералогия руды, производительность установки, содержание в концентрате и т.д.), было установлено, что период окупаемости скальпирования перечистки составляет от двух до семи месяцев.

### **Повышение содержания в медном концентрате**

В течение последних 12 месяцев, пока идет подготовка к увеличению добычи в карьере Майн Доум, на обогатительной фабрике Телфер, помимо основной руды из Майн Доум, также перерабатывается руда Вест Доум. Исторические данные испытаний и экспериментальной эксплуатации показывают, что медный концентрат, полученный из руды Вест Доум, как правило, имеет недостаточное для коммерческой реализации содержание. Это связано с рядом факторов, среди которых следующие:

- высокое содержание пирита в руде Вест Доум,
- минералогия руды Вест Доум: медь преимущественно представлена вторичными медными сульфидами (халькоцит, борнит и т.д.) меньшей крупности по сравнению с медно-сульфидными минералами руды Майн Доум,
- в среднем медно-сульфидные минералы высвобождаются хуже, чем в руде Майн Доум.

Введение ограничений на количество руды Вест Доум в питании позволило преодолеть некоторые из сдерживающих факторов, однако возникали и будут возникать в будущем ситуации, в которых количество руды Вест Доум в питании превышает допустимый уровень.

На рис. 8 показано высвобождение по свободной поверхности медно-сульфидных минералов из руды Мейн Доум при второй перечистной флотации на технологической линии 1 и 2 в двух кварталах (кв. 1 и 2 2010 финансового года) и высвобождение медно-сульфидных минералов из руды Вест Доум при второй перечистной флотации в лабораторных условиях. График наглядно показывает, что сульфиды меди хуже высвобождаются из руды Вест Доум. Этому соответствуют данные высвобождения в медном концентрате основной флотации в промышленных условиях, представленные в таблице 5. Из проведенных минералогических исследований известно, что медно-сульфидные минералы наиболее часто ассоциированы с пиритом в форме жильной либо поверхностной минерализации. На рис. 9 показаны два оптических изображения типичной ассоциации минералов меди и пирита в руде Вест Доум.

Таблица 5. Характеристика высвобождения концентрата основной флотации Вест Доум, полученная при экспериментальной эксплуатации

Минерал	Высвобождение, % (>95%)
Пирит	96,6
Халькопирит	69,8
Другие сульфиды меди	64,9
Другие минералы	97,3

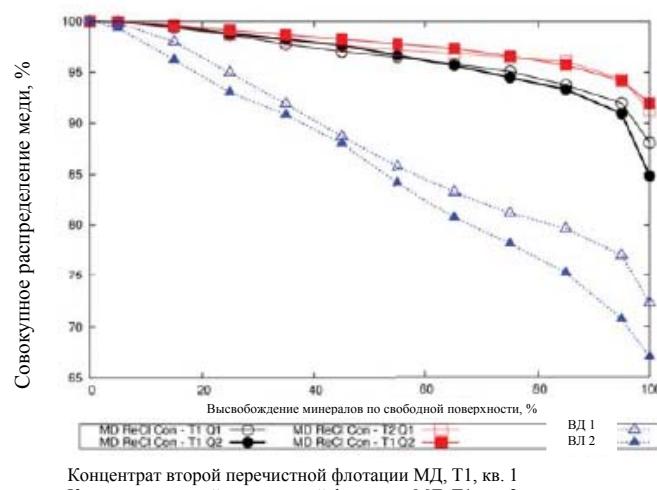


Рис. 8. Сравнение высвобождения по свободной поверхности минералов меди в концентратах второй перечистной флотации из руды Мейн Доум в кв. 1 и 2 2010 года на технологической линии 1 и 2 (Т1 и Т2) и в концентратах второй перечистной флотации из руды Вест Доум в лабораторных условиях (ВД1 и ВД2)

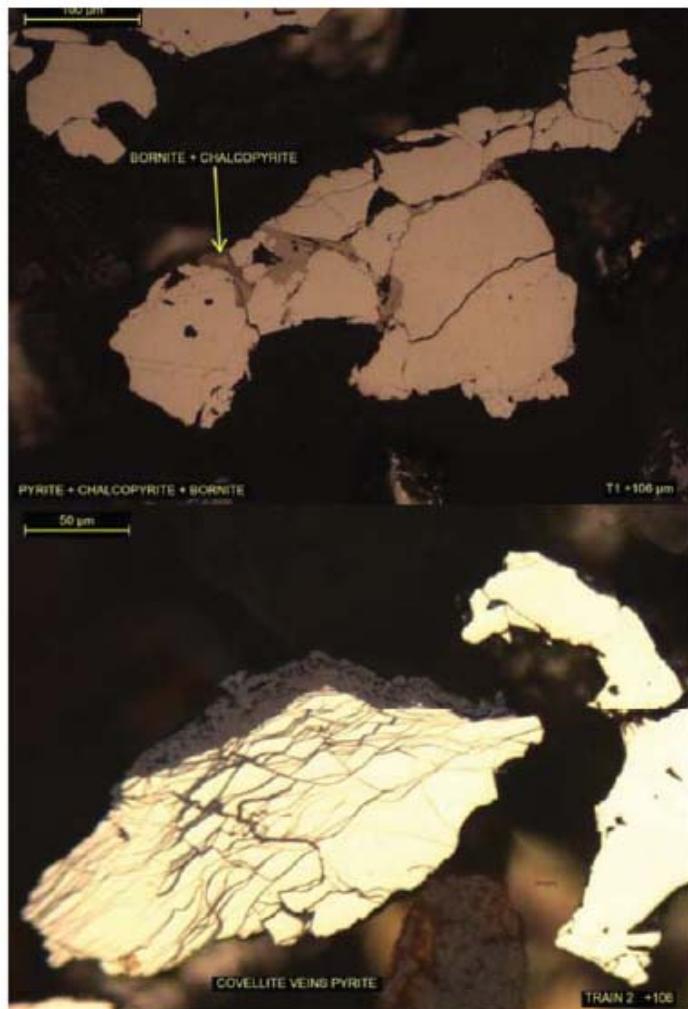


Рис. 9. Примеры включений сульфида меди в частицах пирита

Учитывая описанные проблемы высвобождения, неудивительно, что предпринятые ранее попытки повысить содержание в медном концентрате посредством применения депрессоров, селективных коллекторов или хелатирования (активирующих медь ионов в растворе) были в целом безуспешны.

По результатам перспективных лабораторных тестов с применением доизмельчения между основной флотацией и перечисткой флотацией меди, на предприятии Телфер были проведены испытания пилотной установки IsaMill™ M20 (см. рис. 10) при переработке руды Вест Доум. В пилотную мельницу подавался порциями медный концентрат основной флотации, который проходил измельчение в IsaMill перед флотацией измельченного продукта в лабораторной флотомашине с целью установить, повысит ли доизмельчение медного концентрата основной флотации селективность пирита и минералов меди при флотации. Пилотная мельница также была использована для определения энергопотребления при промышленной эксплуатации посредством построения характерных кривых для медного концентрата основной флотации. Более подробно о пилотной установке и расчетах измельчения, выполненных на другом предприятии, см. в Seaman et al. (2007).

На рис. 11 показана селективность меди и серы при флотации в лабораторных условиях медного концентрата основной флотации технологической линии 2 до и после доизмельчения в пилотной мельнице ISAMill™.

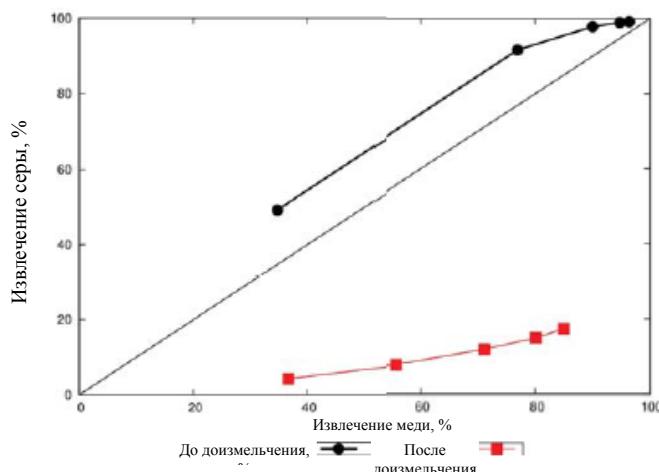


Рис. 11. Селективность меди и серы с доизмельчением и без доизмельчения медного концентрата основной флотации технологической линии 2 при переработке руды Вест Доум



Рис. 10. Для проектирования и масштабирования цикла доизмельчения меди и пирита была использована пилотная установка IsaMill M20

После доизмельчения в пилотной мельнице селективность меди и серы значительно повысилась. Измельченный продукт имел более медленную кинетику флотации по сравнению с неизмельченным продуктом, что, скорее всего, связано с меньшей крупностью частиц на выходе из мельницы. В данном случае класс измельчения  $P_{80}$  питания и продукта доизмельчения составил 40 и 20 мкм, соответственно.

В связи с этим в настоящее время устанавливается мельница доизмельчения для измельчения медного концентрата основной флотации на технологической линии 2 при переработке материала с высоким содержанием руды Вест Доум. Установка IsaMill™ в цикле показана на рис. 2. Медный концентрат основной флотации будет поступать в блок гидроциклонов, нижний продукт будет доизмельчаться в мельнице IsaMill™ M3000 (мощность 1 мВт), работающей в открытом цикле. Слив гидроциклонов будут поступать под действием силы тяжести в разгрузочный бункер мельницы и вместе с продуктом мельницы будет подаваться насосом в существующий цикл перечистной флотации. Будет установлен бункер разгрузки большой емкости с воздухораспределителями, обеспечивающий достаточное для прохождения флотации окисление пульпы после уменьшения класса крупности в мельнице IsaMill™.

## **Повышение извлечения золота из пиритного концентрата**

Исторические показатели эффективности цикла CIL на фабрике Телфер ниже нормальных для отрасли, а в настоящее время среднее извлечение золота, содержащегося в пиритном концентрате, составляет 75,2%. Детальный диагностический анализ факторов, влияющих на эффективность цикла CIL, содержится в Burns et al. (2012). По результатам анализа крупностей, диагностических тестов выщелачивания и подробного минералогического исследования в указанной работе установлено, что неудовлетворительное высвобождение зерен золота в крупных частицах пирита было основной причиной недостаточной эффективности выщелачивания пиритного концентрата на фабрике Телфер. Кроме того, было обнаружено, что высокий расход реагентов в цикле вызван проникновением в цикл CIL большого количества растворимой в цианиде меди (преимущественно в виде композитных с пиритом частиц).

В Burns et al. (2012) показано, что оптимальным подходом к повышению эффективности цикла CIL (повышение извлечения и сокращение эксплуатационных расходов) является установка мельницы доизмельчения в существующем потоке питания цикла CIL с последующим удалением высвобожденных частиц золота и меди флотацией (вторая перечистная флотация пирита) перед выщелачиванием хвостов флотации. При проведении лабораторного и пилотного тестирования извлечение золота повысилось примерно до 90% от общего извлечения золота при более высоком извлечении меди и сокращении примерно на 25% расхода цианида в цикле CIL вследствие снижения концентрации растворимой в цианиде меди в питании CIL.

Улучшение показателей связано с высвобождением мелких зерен золота (~ 5-10 мкм), заключенных в более крупных частицах пирита. Большая часть этого золота (~ 50-75%) будет извлечена флотацией и объединена с коммерческим медным концентратом перед выщелачиванием хвостов флотации. На рис. 12 показаны микрофотографии типичных включений золота в пирит перед доизмельчением.

Эффективность такой конфигурации цикла и критерии масштабирования были рассчитаны с использованием пилотных и лабораторных методик. Для доизмельчения питания CIL до различных крупностей при подготовке к лабораторной серии тестов по флотации и диагностическому контролю выщелачивания в бутылях была использована пилотная мельница IsaMill™ M20 мощностью 1,5 кВт (см. рис. 10). Помимо подготовки питания для лабораторных тестов, пилотная мельница также позволила построить кривые энергопотребления, которые были впоследствии использованы для масштабирования мощности промышленной установки.

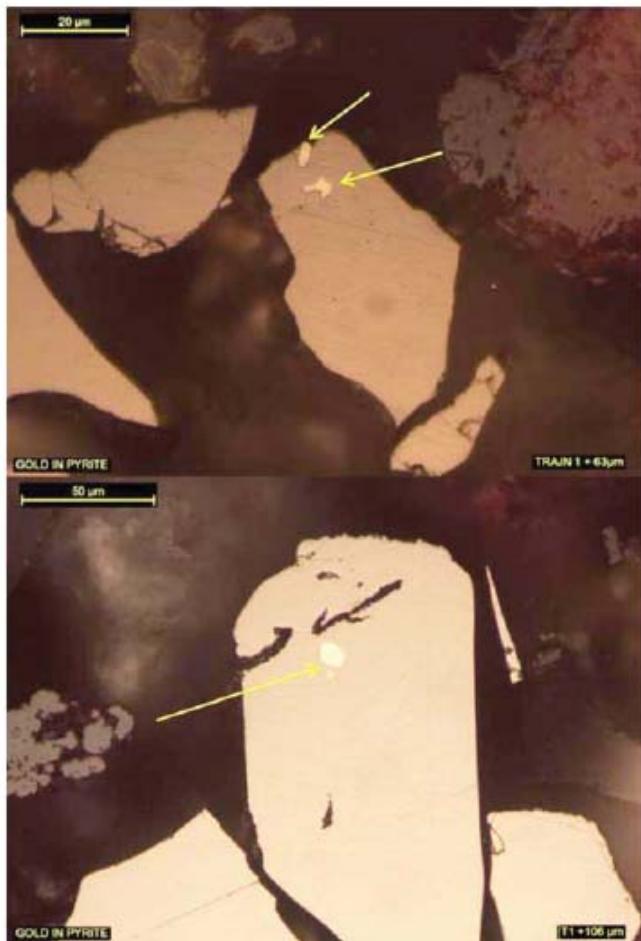


Рис. 12. Примеры включений золота в более крупных частицах пирита.

На рис. 13 показано извлечение золота после доизмельчения до различных крупностей при пилотном тестировании (каждая последовательность данных соответствует одному дню проведения тестов). При требуемой крупности доизмельчения 25 мкм флотационное извлечение в некоторых из тестов было приближено к текущему извлечению золота в цикле CIL (~ 75%). Ожидается, что эксплуатационные расходы на доизмельчение составят примерно 10% в пересчете на унцию от эксплуатационных расходов цикла CIL. Если высокое флотационное извлечение золота будет стабильно достигаться при промышленной эксплуатации, это может стать достаточным основанием для демонтажа цикла CIL в перспективе, когда себестоимость выщелачивания станет необоснованно высокой. Несмотря на то что извлечение золота значительно снижалось при измельчении до класса P<sub>80</sub> менее 20-25 мкм. Авторы предполагают, что это может быть связано с переизмельчением золота / композитных частиц золота с более высоким содержанием сульфидной пустой породы по сравнению с пиритом с более низким содержанием сульфидной пустой породы вследствие классификации внутри мельницы IsaMill™. Эта проблема будет изучена дополнительно после запуска цикла в эксплуатацию.

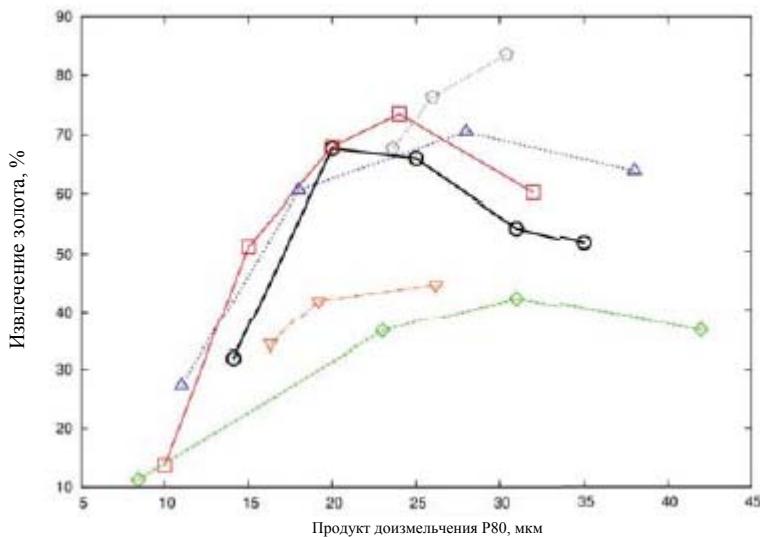


Рис. 13. Флотационное извлечение золота на стадии второй перечистной флотации пирита в зависимости от класса доизмельчения ( $P_{80}$ ) в разные дни

Мельница IsaMill™ (M5000) мощностью 1,5 мВт устанавливается для доизмельчения пиритного концентрата до требуемого класса крупности  $P_{80}$  25 мкм при максимальной проектной производительности 90 т/ч. В качестве питания в мельницу будут поступать пески действующего двухстадийного цикла обесшламливания с гидроциклонами. Продукт мельницы будет разгружаться в бункер увеличенной емкости (расчитанный примерно на пять минут пребывания), в котором технологический воздух будет распределяться по пульпе для повышения уровня растворенного кислорода в пульпе для лучшей депрессии пирита и флотации золота. После перекачивания в батарею из пяти флотомашин Outotec емкостью 30 куб.м (вторая перечистная флотация пирита) пульпа будет разбавляться. Флотомашины будут оборудованы статорами с большими сдвиговыми усилиями (Bilney et al., 2006) и механизмами флотации (Coleman, Rinne, 2011) для создания оптимальных условий флотации тонкого класса. После цикла концентрат второй перечистной флотации пирита сможет подаваться в емкости для конечного медного концентрата или в цикл перечистной флотации меди, если будет необходима дополнительная сепарация пирита. Хвосты второй перечистной флотации пирита будут направляться в существующий цикл выщелачивания для дальнейшего извлечения золота, а также смогут быть направлены в обход цикла CIL как отвальные хвосты.

## Заключение

Первая очередь (установка скальпирования / снятие головки перечистной флотации меди, флотомашины Джеймсон) текущего проекта переоборудования обогатительной фабрики Телфер выполнена успешно и в соответствии с ожиданиями. Вторая и третья очередь переоборудования находились в процессе выполнения на момент написания настоящей статьи, но должны быть завершены до представления настоящей работы на конференции. Мельница доизмельчения меди позволит повысить содержание меди в концентрате при переработке руды Вест Доум посредством высвобождения минералов меди из медно-пиритных бинарных частиц (преимущественно халькопирит и халькоцит). Такое переоборудование цикла необходимо с учетом того, что фабрика Телфер приступает к переработке руды Вест Доум.

Цикл доизмельчения пирита позволит повысить извлечение золота из пирита и сократить эксплуатационные расходы существующего цикла CIL.

Проект будет выполнен в течение 12 месяцев с момента начала работ на объекте и в течение 14 месяцев с момента утверждения бюджета всех очередей проекта компанией Newcrest Mining.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность Newcrest Mining Limited за разрешение опубликовать настоящую работу. В лабораторных исследованиях, пилотных тестах, разработке технологии, а также в непосредственном выполнении работ на обогатительной фабрике Телфер участвовало множество специалистов. В частности, Крейг Чейз-Данлоп сыграл важную роль в координации строительных работ на объекте, а Барри Гринсилл осуществлял квалифицированное руководство проектом. Авторы выражают глубокую признательность всем тем сотрудникам фабрики Телфер, которые помогли успешно выполнить настоящий проект.

## Список использованной литературы

- Benson, M A, Headley, C R, Hille, S O and Jacob, N P, 2007. Differential flotation commissioning at Telfer, in Proceedings Ninth Mill Operators' Conference, pp 17-24 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- Bilney, T, MacKinnon, S and Kok, J. 2006. Assessment of high shear stator performance at Kanowna Belle gold mine, in Proceedings MetPlant 2006, pp 312-320 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- Burns, F, Seaman, D, Peng, Y and Bradshaw, D, 2012. Development of pyrite regrind at Telfer gold mine, in Proceedings 11th Mill Operators' Conference, pp 45-52 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- Coleman, R, and Rinne, A, 2011. Flotation mechanism design for improved metallurgical and energy performance, in Proceedings of MetPlant 2011, pp 405-418. (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- Evans, G.M, Atkinson, B,W and Jameson, G J, 1995. The Jameson cell, Flotation Science and Technology (ed: K A Matis), pp 331-363 (Marcel Dekker Inc: New York).
- Goulsbra, A, Dunne, R, Lane, G, Dreisinger, D and Hart, S, 2003. Telfer project process plant design, in Proceedings Eighth Mill Operators' Conference, pp 103-113 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- Pease, J D, Curry, D C, Barns, K E, Young, M F and Rule, C, 2006. Transforming flowsheet design with inert grinding – The Isa Mill, in Proceedings of the 38th Annual Canadian Mineral Processors (Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum: Montreal).
- Rule, C, and de Waal, H, 2011. IsaMillTM Design improvements and operational performance at Anglo Platinum, in Proceedings MetPlant 2011, pp 176-192 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- Seaman, D R, Barns, K E, Sharman, P J, Thomas, S A and Stokes, K J, 2007. Process design of a regrind facility at the Leinster Nickel Operations to improve concentrator recovery, in Proceedings Ninth Mill Operators' Conference, pp 131-138 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).
- Seaman, D R, Manton, P and Griffi n, 2011. Separation efficiency improvement of a low-grade copper-gold flotation circuit, in Proceedings Procemin 2011, pp 263-272 (The Mining Engineering Department of Universidad de Chile and Gecamin: Santiago)
- Young, M, Barns, K, Anderson, G and Pease, J, 2006. Jameson cell: The 'comeback' in base metals applications using improved design and flowsheet, in Proceedings 38th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors, pp 311—322 (Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum: Montreal).

Zheng, X, Crawford, A and Manton, P, 2009. Telfer Train 1 copper flotation circuit reconfiguration, in Proceedings Tenth Mill Operators' Conference, pp 233-243 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Zheng, X, Manton, P, Burns, F, Crawford, A, and Griffi n, P, 2010. Operating strategies to maximise gold recovery at Telfer, Minerals Engineering, 23(15):1159-1166.