



УДК 622.755

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ В КОНЦЕНТРАТОРАХ KNELSON И FALCON SB*

В. А. БОЧАРОВ, А. В. ГУРИКОВ, В. В. ГУРИКОВ (МИСиС)

В последние годы центробежные концентраторы (ЦБК) установлены на многих обогатительных фабриках. В России и за рубежом хорошо зарекомендовали себя концентраторы канадской фирмы «Knelson Inc.». В этой статье предпринята попытка сравнить процессы разделения золотосодержащих продуктов в концентраторах Knelson (рис. 1) и концентраторах более молодой фирмы «Falcon Inc.» (рис. 2).

Политехническим университетом Вирджинии (США) и другими исследователями сформулированы основные технологические особенности и критерии сравнения конструктивных параметров ЦБК [1–4].

Площадь концентрации. При одинаковых диаметрах аппаратов площадь концентрации в Falcon значительно больше, чем в Knelson.

Центробежное поле. Концентраторы Falcon позволяют менять скорость вращения и, следовательно, ускорение, тогда как концентраторы Knelson имеют постоянную скорость вращения. Интенсивность центробежного поля в концентраторах Knelson находится в интервале 60–300g, а в концентраторах Falcon может плавно меняться от 0 до 250g.

Ускорение пульпы. Для эффективного разделения необходимо не только вращение чаши, но и дополнительное ускорение пульпы. Это объясняется тем, что коэффициент трения слоев пульпы между собой и стенкой чаши весьма мал, поэтому пульпа вращается с меньшей скоростью, чем чаша, и, следовательно, испытывает меньшие центробежные силы, благодаря которым собственно и происходит разделение тяжелой и легкой фракций.

Концентраторы Falcon в отличие от Knelson имеют импеллер для разгона пульпы. Наличие импеллера способствует повышению эффективности разделения.

Способ подачи воды. В концентраторах Knelson вода для оживления пульпы подается тангенциально стенке ротора, в концентраторах Falcon — перпендикулярно стенке ротора. Глубина рифлей в Falcon позволяет иметь больший диаметр отверстий для подачи воды, чем в концентраторах Knelson. Все это приводит к тому, что забивание отверстий в концен-

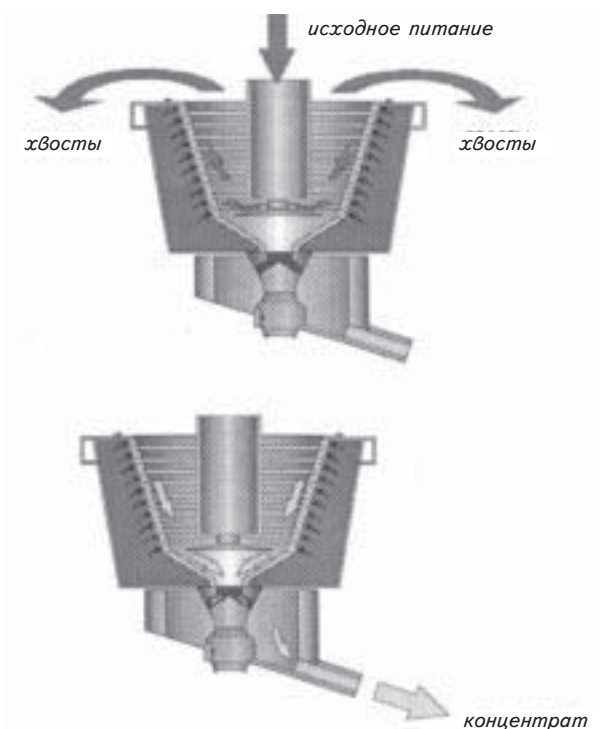


Рис. 1. Концентратор Knelson

траторах Falcon менее вероятно, чем в концентраторах Knelson.

В концентраторах Falcon вода подается только в верхнюю треть чаши. В нижней части происходит сегрегационное разделение смеси, что позволяет тонким частицам золота оказаться внизу минеральной постели и, следовательно, в межрифельном пространстве.

В табл. 1 приведены данные по расходу дополнительно подаваемой воды в концентраторах Knelson и Falcon в зависимости от ее давления [5]. Большой расход воды в Falcon, обусловленный более крупными отверстиями для подачи воды, затрудняет использование этих аппаратов в циклах измельчения, где обводнение процесса противопоказано.

Циркуляция пульпы в зоне оживления. Зона оживления называется область подачи дополнительной воды в чаше (где находятся нарифления).

* Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ РАН.

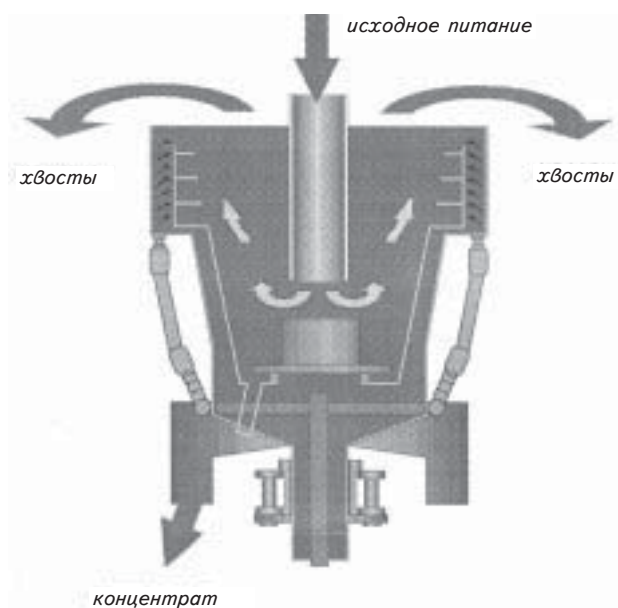


Рис. 2. Концентратор Falcon

Т а б л и ц а 1
Зависимость расхода дополнительной воды от давления

Давление, кПа	Расход воды, л/мин	
	Knelson	Falcon
10	6,15	9,84
20	7,66	11,05
30	9,17	12,26
40	10,68	13,47
50	12,18	14,68
60	13,69	15,89
70	15,20	17,10
80	16,71	18,31
90	18,21	19,52
100	19,75	20,73

Циркуляции пульпы в зоне ожигения концентраторов Knelson и Falcon SB различны. Это обусловлено наличием в концентраторах Falcon так называемой зоны сегрегации.

В концентраторе Knelson мелким тяжелым частицам золота сложнее войти в межрифельное пространство из-за наличия потока дополнительной подаваемой воды.

В концентраторе Falcon мелкие тяжелые частицы при входе в зону ожигения уже находятся внизу минеральной постели. В соответствии с распределением скоростей нижний пристенный слой движется медленнее, чем верхний. Это позволяет частицам золота проскользнуть к поверхности чаши, тогда как легкие частицы пустой породы, находящиеся в верхнем слое, выбрасываются из концентратора и уходят в хвосты. Теоретически, правильно подобрав производительность, можно добиться полного сегрегационного разделения и полного извлечения золота.

Способы концентрации. В зависимости от давления дополнительно подаваемой воды легкие частицы могут застревать в межрифельном пространстве, образовывать рыхлую постель или же просто отбрасываться от рифлей. Скорость потока, при которой достигается каждое из этих состояний, зависит от размера и плотности частиц.

Исследованиями [5] показано, что в центробежных концентраторах с ожигающим потоком воды возможны четыре способа концентрации (в зависимости от давления воды в водяной рубашке, а также от относительного размера частиц пустой породы и золота).

При низких значениях давления воды частицы пустой породы застревают в межрифельном пространстве и образуют неподвижную постель. Если тяжелые частицы меньше, чем зазоры между крупными частицами, то они могут достичь дна межрифельного пространства и быть извлечены в концентрат. Этот способ концентрации называют «концентрацией проскальзыванием».

Если тяжелые частицы больше, чем пустоты между крупными частицами, то они не смогут проникнуть через слой частиц пустой породы. Однако благодаря центробежной силе они могут концентрироваться над минеральной постелью. Этот способ концентрации называют «концентрацией над минеральной постелью».

При средних значениях давления воды минеральная постель разрыхлена и тяжелые частицы проникают через нее и накапливаются в межрифельном пространстве. Аккумуляция тяжелых частиц уменьшает место в межрифельном пространстве, поэтому легкие частицы уходят в хвосты. Этот способ концентрации называют «концентрацией замещением».

При высоких значениях давления воды легкие частицы вообще отбрасываются от нарифлений и уходят в хвосты. Этот способ концентрации называют «концентрацией отбрасыванием».

При концентрации проскальзыванием извлечение золота прекращается, когда все пустоты неподвижной минеральной постели заняты. Дополнительная подача питания приведет к попаданию содержащегося в нем золота в хвосты.

При концентрации над минеральной постелью извлечение зависит от гидродинамической силы влечения тяжелых частиц, сконцентрировавшихся над минеральной постелью, потоком пульпы.

При концентрации замещением или отбрасыванием извлечение золота зависит от относительного размера тяжелых и легких частиц. Например, давление воды, необходимое для разрыхления или отбрасывания крупных минеральных частиц пустой породы, может быть выше, чем давление, которое окажет такой же эффект на мелкие частицы золота.

Следует отметить, что для руды с широким диапазоном крупности частиц золота и пустой породы все способы концентрации реализуются одновременно.

Вполне вероятно, что в концентраторах Falcon имеет место только концентрация замещением и отбрасыванием, так как тяжелые частицы оказываются уже почти полностью сегрегированы к моменту, когда они входят в зону ожигения.

В последние годы появились некоторые публикации зарубежных авторов с анализом работы центробежных концентраторов.

В работе [6] изучена возможность применения концентраторов Knelson для переработки различных золотосодержащих руд и продуктов и показана весьма высокая их эффективность — извлечение золота в ряде случаев составляет около 99 %. Проведено также исследование по сравнению работы концентраторов Knelson и Falcon.

Эффективность работы промышленных 20–30-дюймовых концентраторов Knelson была оценена на основе данных их эксплуатации на обогатительных фабриках «Люсьен Беливю», «Хемло», «Местон», «Аурбел», «Ист Малартик».

Извлечение гравитационного золота на разных фабриках, перерабатывающих различное минеральное сырье, варьирует в широких пределах — 20–92 %. Приведенные результаты неоднозначны и требуют комментариев.

Показатели работы концентраторов Knelson варьируют в гораздо более широких пределах, чем предполагалось ранее. Отмечается, что извлечение мелкого золота значительно снижается с ростом производительности. Поскольку высокие результаты работы концентраторов Knelson выражаются главным образом в эффективном извлечении тонкого золота после цикла измельчения, то рекомендации по их использованию должны быть тщательно проверены. Извлечение золота, полученное в лабораторных концентраторах Knelson, должно быть подтверждено в промышленных условиях на аналогичном сырье.

Следует также отметить, что, по данным [6], на большинстве объектов промышленный концентратор Knelson ни разу не достиг извлечения, полученного в лабораторном 3-дюймовом концентраторе. Наилучшие результаты получены при работе промышленного концентратора с производительностью лишь 30 % от номинальной.

В другой работе д-р Андре Лапланте показал, что концентраторы Falcon значительно лучше концентраторов Knelson извлекают мелкое (мельче 37 мкм) золото. При этом высказано предположение, что основным фактором, определяющим показатели обогащения, является соотношение давления дополнительно подаваемой воды и ускорения.

В статье [5] также приводится пример, показывающий, что высокие извлечения в концентраторах Knelson достигаются при производительностях, значительно ниже номинальных. Там же отмечается, что промышленный концентратор KC-CD20MS с номинальной производительностью 13,6 т/ч показыва-

ет хорошие результаты лишь при производительности 3 т/ч, а промышленный концентратор KC-CD30MS, имеющий номинальную производительность 40 т/ч, при производительности 30 т/ч извлекает менее 30 % золота.

В университетах Льежа (Бельгия) и Атакамы (Чили) проведено совместное исследование по сравнению концентраторов Knelson и Falcon на искусственных смесях частиц разной крупности и формы [7]. Вместо золота использован вольфрам, имеющий практически такую же плотность (19,1 г/см³ у вольфрама и 19,3 г/см³ у золота).

Изучены зависимости извлечения вольфрама от давления воды для частиц кварца и вольфрама разной крупности (рис. 3). В концентраторе Falcon получены извлечения, близкие к 100 %, во всем диапазоне давлений, в то время как извлечения в концентраторе Knelson резко падают при высоких давлениях воды. Это особенно заметно для частиц вольфрама крупностью –38 мкм. Разрыхление пустой породы происходит уже при давлении 5–15 кПа в зависимости от размера частиц. Использование более высокого давления позволяет получать более чистые концентраты.

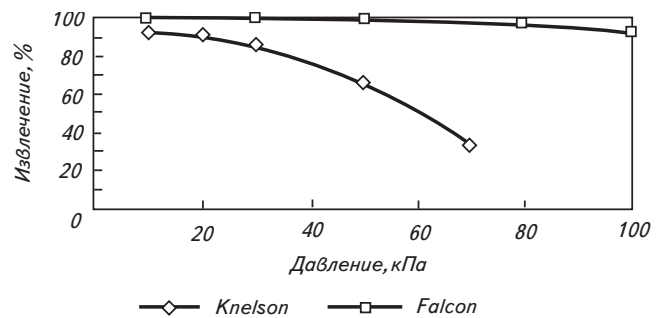


Рис. 3. Извлечение вольфрама крупностью 0–38 мкм из смеси с кварцем крупностью 74–104 мкм

Показано также [5], что размер частиц пустой породы не оказывает существенного влияния на извлечение вольфрама. Это можно объяснить тем, что легкие частицы разрыхляют минеральную постель даже при низких значениях давления воды.

Изучение зависимости извлечения галенита из смеси с кварцем (1 : 10 соответственно) от давления воды показало, что при тех же параметрах давления извлечение в обоих концентраторах несколько ниже, чем извлечение вольфрамита в предыдущих опытах [5]. Так, при давлении 50 кПа извлечение в Falcon на 30–50 % ниже, чем в Knelson.

Отечественная практика применения рассматриваемых центробежных концентраторов на различном минеральном сырье в большинстве случаев подтверждает их высокую эффективность. В настоящее время на предприятиях РФ работают около сотни гравитационных установок с аппаратами Knelson. Значительно меньшее распространение получили аппараты Falcon. Концентраторы Falcon только начинают при-

менять при обогащении различного минерального сырья россыпных и коренных месторождений.

Выполнить глубокий сравнительный анализ работы этих аппаратов на основании результатов, получаемых на отечественных и зарубежных предприятиях, из-за отсутствия информации не представляется возможным. Зарубежная информация в большинстве случаев носит рекламный характер. Поэтому технологическая оценка этих аппаратов чаще производится на основе сопоставления результатов их работы с показателями известных гравитационных аппаратов (отсадочных машин, винтовых сепараторов, концентраторных столов, отечественных ЦБК и др.).

Многие авторы отмечают, что при извлечении золота крупнее 0,2 мм аппарат Knelson и отсадочная машина работают одинаково эффективно, а золото мельче 0,2 мм в аппарате Knelson извлекается значительно полнее. На песках мелких классов крупности отечественные концентраторные столы работают не менее эффективно, чем Knelson. Замечено также, что аппараты Knelson значительно лучше извлекают мелкие частицы золота крупностью $-0,1+0,044$ мм.

Хорошие результаты [8] получены на техногенной россыпи Исовского полигона при извлечении мелких и тонких частиц платины и золота: концентрация драгоценных металлов увеличена в 2,5–5,0 раз по сравнению с концентрацией, обеспечиваемой существующей технологией.

Высокая концентрация золота и платины достигнута также при их извлечении в концентраторах Knelson-KC-MD-30 из хвостов обогащения титано-магнетитовых руд Качканара.

Промышленными испытаниями концентраторов Knelson-48 на вкрапленных рудах месторождения Норильск-1 показана возможность получения в цикле измельчения руды гравитационного концентрата с высокой концентрацией металлов платиновой группы при извлечении от руды более 15 %, потери с хвостами флотации снижены на 8–10 % [9, 10].

Пирротиновые и пиритные концентраты, заскладированные в хранилищах многих обогатительных фабрик, перерабатывающих сульфидные руды цветных металлов, также могут быть переработаны с извлечением гравитационных концентратов благородных металлов.

Гравитационное извлечение золота организовано на Гайской ОФ. Крупность золота варьирует от нескольких микрометров до 1 мм. В концентраты гравитации улавливаются частицы золота крупнее 20–25 мкм. В крупных и средних классах всех продуктов измельчения и обогащения отмечаются золотины пластинчатой формы со следами механических воздействий, что свидетельствует о развальцовывании и расплющивании частиц золота на разных стадиях измельчения. Это создает трудности для извлечения золота и при флотации.

Наличие в продуктах гравитационного передела тонкого свободного золота и концентрация его по стадиям измельчения предопределили необходимость подробного изучения возможностей использования центробежных и других концентраторов на продуктах Гайской обогатительной фабрики [7]. С начала 2001 года на части потока работает установка, включающая грохот, короткоконусный гидроциклон и центробежный концентратор Knelson-CD30MS с автоматической разгрузкой концентрата. Концентратор Knelson-CD30MS был выбран, как один из достаточно производительных (60 т/ч) и надежных аппаратов, работающих с высокой эффективностью [11].

Установка гравитационных аппаратов на весь объем переработки руд позволит значительно повысить извлечение золота и выпуск драгоценных металлов.

Приведенные результаты убедительно подтверждают, что увеличивающаяся в концентраторе в 60 раз сила тяжести каждой частицы размером от 0,2 до 0,04 мм и меньше позволяет ей внедриться в образующийся на кольцах работающего конуса уплотненный слой. В результате выход тяжелых фракций в гравитационном аппарате возрастает в несколько раз.

Проведенные исследования показали, что концентратор Falcon значительно эффективнее извлекает золото крупностью -38 мкм и более.

Таким образом, гравитационное разделение в ЦБК Falcon и Knelson имеет ряд существенных отличий.

В табл. 2 приведена сравнительная характеристика концентраторов.

Проведенный анализ показывает достаточно высокую эффективность использования ЦБК. Однако

Таблица 2
Сравнительная характеристика концентраторов Knelson CD30 и Falcon Superbowl SB4 [5]

Параметры	Falcon	Knelson
Производительность по твердому, т/ч	55	30
Прейскурантная цена, долл. США	100360	116730
в т. ч. концентратора	77350	88500
системы автоконтроля	23010	28230
Капитальные затраты на тонну производительности, долл. США	1672	3889
Продолжительность сполоска, с	< 40	> 240
Масса концентрата за цикл, кг	80	30
Площадь поверхности ротора, см ²	16800	8400
Объем ротора, см ³	295000	132000
Основание концентратора, см×см	188×188	195×208
Высота концентратора, см	265	193
Масса концентратора, кг	2910	1930
Мощность двигателя, кВт	30	12
Способ подачи воды	перпен.	тангенц.
Потребление воды*, л/мин	680/940	570/760
л/т	680/940	1135/1515
Давление воды*, кг/см ²	0,35/0,7	0,7/1,4
Центробежное поле*, g	50/200	60/60

* В числителе — минимальное, в знаменателе — максимальное.

они не всегда могут дать желаемые результаты. К их выбору и рекомендациям установки на промышленных объектах нужно подходить осторожно и только после глубокого анализа и лабораторной проверки. А если учесть, что стоимость зарубежных концентраторов почти в 30 раз превышает стоимость отечественных аналогов, то необходимость тщательных экономических расчетов становится очевидной.

Список литературы

1. Criteria for comparison of enhanced gravity concentration equipment for mineral processing applications, 1999. <http://www.concentrators.net//tech.html>.
2. Criteria for comparison of enhanced gravity concentration equipment for mineral processing applications, 2001. <http://www.concentrators.net>.
3. Knelson Concentrators, 2001. <http://www.knelson.com>.
4. Laplante A. R. A comparative study of two centrifugal concentrators // 24th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors. Ottawa, Canada, 1993.
5. Ancia Ph., Frenay J., Dandois Ph. Comparison of the Knelson and Falcon centrifugal concentrators, 1997.
6. Laplante A. R. An investigation of the Super-Bowl at Mineral Hill and Knelson at Casa Berardi Mines: Report on the first year of the NSERC-CRD Project 661-148-95, 1999.
7. Чантурия Е. А., Бочаров В. А. Изучение природы и технологических свойств золота в сульфидных медно-цинковых рудах Гайского месторождения // Цв. металлы. 2001. № 6. С. 61–65.
8. Разработка технологии извлечения драгоценных металлов из минерального сырья гравитацией / К. А. Плеханов, Л. Д. Шевелева, М. Г. Видуэцкий и др. // Научные

основы и прогрессивные технологии переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья благородных металлов / РАН и АГН. Екатеринбург: Изд. АМБ, 2001. С. 126–128.

9. Михнев А. Д., Рюмин А. И. Применение концентратора Knelson для обогащения различных золотосодержащих материалов; Подборка статей «Проблемы золотодобычи в России» // Горн. журн. 1998. № 5. С. 4–96.

10. Развитие технологии гравитационного обогащения на Норильском комбинате / Ю. В. Благодатин, А. А. Яценко, Ю. А. Салаедкин и др. // Цв. металлы. 1998. № 10–11. С. 29–31.

11. Исследования по повышению извлечения золота гравитационными методами при переработке шахтных руд на Гайской обогатительной фабрике / Е. Н. Шумская, А. В. Богданович, Ю. И. Старостин и др. // Обогащение руд. 2000. № 3. С. 12–14.

ANALYSIS OF GOLD-CONTAINING PRODUCTS SEPARATION PROCESSES IN KNELSON AND FALCON SB CONCENTRATORS

V. A. BOCHAROV, A. V. GURIKOV,
V. V. GURIKOV

Results of testing and full-scale application of Knelson and Falcon SB concentrators for gold-containing mineral products in domestic and foreign practice are analyzed. Main operating and design parameters as area and methods of concentration, centrifugal field, pulp acceleration and circulation, etc. are compared. It is noted, that commercial application of this equipment demands detailed analytic and laboratory investigations, as well as deep technical-and-economic assessment.

IX МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ ПО ОБОГАЩЕНИЮ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ КАППАДОКИЯ (ТУРЦИЯ), 18–20 СЕНТЯБРЯ 2002 Г.

Международный симпозиум по обогащению полезных ископаемых, который проходит каждые 2 года в Турции, будет посвящен представлению и обсуждению научных исследований и технологических разработок в областях подготовки рудного сырья и угля, обогащения промышленных минералов и контроля за отходами.

Организаторы симпозиума — университеты Hacettepe и Osmangazi.

Основные темы: характеристика минералов; измельчение, мокрая и сухая классификация; физическая сепарация; поверхностная химия и флотация; гидрометаллургическая обработка; сепарация твердой и жидкой фазы; обогащение промышленных минералов; подготовка угля; утилизация благородных металлов; моделирование и оптимизация технологических процессов; проектирование оборудования; переработка и рециклинг отходов; новые разработки в области обогащения полезных ископаемых.

Официальный язык симпозиума английский.

Одновременно с симпозиумом в отеле «Dedemon» будет организована выставка фирм, работающих в обогатительном секторе индустрии.

Рефераты докладов будут опубликованы в сборнике трудов симпозиума.

Желающие принять участие в работе симпозиума могут присылать заявки до 1 сентября 2002 г.

Регистрационный взнос, покрывающий издание трудов симпозиума, а также ланчи, прохладительные напитки и коктейли, составляет: при уплате до 30 июня — \$ 400 (для участников), \$ 200 (для сопровождающих лиц); при уплате после 30 июня — \$ 450 (для участников), \$ 250 (для сопровождающих лиц).

Взнос следует перечислить на банковский счет симпозиума: **Turkish Mining Development Foundation. Vakıfbank Çayolu Branch, Ankara, Turkey. 379-4002685.**

Всю переписку адресовать на имя проф. Suat Özkol: IX International Mineral Processing Symposium. Hacettepe University, Mining Engineering Department. 06532 - Beytepe - Ankara - TURKEY. Тел.: + 90-312-297-7600. Факс: + 90-312-299-2155. E-mail: mining@hacettepe.edu.tr. Internet: <http://www.imps.hacettepe.edu.tr>, <http://www.min-eng.com>