

На правах рукописи



Березкина Наталья Александровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ  
ТЕХНОЛОГИИ РАФИНИРОВАНИЯ МЕДНОГО КОНЦЕНТРАТА  
ОТ ФЛОТАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО  
ФАЙНШТЕЙНА**

Специальность 05.16.02. - "Металлургия черных, цветных и редких  
металлов"

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2005

**Работа выполнена в ОАО "Институт Гипроцветмет"**

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
Шварцер Яков Михайлович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РАН  
Набоченко Станислав Степанович  
кандидат технических наук, доцент  
Андреев Юрий Владимирович

**Ведущая организация:** ОАО "Колская горно-металлургическая компания", г. Мончегорск

Защита состоится 20 сентября 2005 г. в 10 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.14 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ГОУ "СПбГПУ", химический корпус, ауд.51.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Автореферат разослан 21 сентября 2005 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.14  
доктор технических наук



Козлов С.Ю.

**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.\***

**Актуальность темы.** Диссертационная работа посвящена решению актуальных задач, связанных с проблемой переработки сухих свертучих шлаков, получаемых при переметаллургической переработке медных концентратов. Эта проблема важна тем, что медные концентраты от флотационного разделения фаялитовых пород содержат 3-5,5% никеля и до 4-5% железа, которые при последующей переметаллургической переработке концентратов переходят в сухие шлаки. Дальнейшая переработка этих шлаков в электротермическом производстве на медно-никельной фаялитовой породе приводит к увеличению объема вторичного фаялитового усадки, ухудшению его структуры, возрастанию потерь металла с отвалными шлаками, росту эксплуатационных затрат в переметаллургическом производстве. Другая, более эффективная технология переработки сухих свертучих шлаков до сих пор не найдена.

Устранение проблемы переработки сухих шлаков возможно путем снижения содержания никеля и железа в медных концентратах, что не только позволит перерабатывать рефинерованные медные концентраты более эффективными методами, например автогенной плавкой в печи Ванкоова, но и повысить качественные показатели металлов.

Одним из наиболее перспективных способов удаления никеля и железа из медных концентратов является гидрометаллургический метод, в основе которого лежит взаимодействие при повышенной температуре сульфидов никеля и железа с раствором сульфата меди.

**Целью диссертационной работы** является разработка гидрометаллургической технологии рефинирования медного концентрата, позволяющей снизить содержание никеля и железа до менее 0,5% каждого, и исследование закономерностей процесса, протекающего при рефинировании, путем решения следующей задачи:

- исследование возможных вариантов гидрометаллургических технологий для снижения содержания никеля и железа в медном концентрате;
- определение влияния различных параметров (температура, скорости перемешивания, парциального давления кислорода и др.) на скорость окислительного выщелачивания медного концентрата;

\* Автор выражает глубокую благодарность к.т.н. Л.В.Фроловой за помощь в решении некоторых вопросов и подготовке настоящего отчета.

- исследование химизма и механизмов процессов, протекающих при гидротермальной обработке (ГТО) (повышения вязкости и жидкости в условиях гидротермальной обработки)

- определение оптимальных условий операций разрабатываемой технологии.

#### Методы исследования

- экспериментальные: исследованы на лабораторных установках в атмосферных и в автоклавных условиях; методы анализа – химический, рентгеноструктурный, рентгеноспектральный микроанализ;

- теоретические: анализ процессов, протекающих на всех стадиях разрабатываемой технологии, термодинамический анализ;

- метод математического моделирования для масштабирования процессов технологии.

#### На защиту выносятся

- результаты исследований химизма и механизмов процессов, протекающих при ГТО

- параметры и условия проведения операций разрабатываемой технологии.

#### Научная новизна

- Установлен и теоретически обоснован аномальный характер зависимости перехода меди в раствор от температуры при недостаточной аэрации на атмосферной стадии;

- Найдены законы и механизмы окисления в восстановительной ферро-шихте при ГТО;

- Теоретически обоснован механизм образования полисульфидов при гидротермальной обработке медного концентрата в чистой воде и в растворе сульфата меди. Существование гидротермальной стадии полисульфидов путем окисления малларита в присутствии медно-содержащих сульфидов в бескислородных условиях;

- Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена роль комплексов в процессах окисления и восстановления меди, а также при образовании полисульфидов в условиях гидротермальной обработки.

#### Практическая ценность

- Показана возможность снижения содержания железа до менее 0,5% в медном концентрате при прямом рафинировании путем подщелачивания концентрата известняком или известково-содержащего материала.

- Разработана технологическая схема гидротермального рафинирования медного концентрата с получением высококачественного медного продукта с содержанием

железа в шихте и шихте менее 0,5% каждого, пригодного для последующей гидрометаллургической переработки путем высокоэффективной автоклавной плашки (например, в шихте Вискокс).

- Разработанная технология применима в условиях существующего гидрометаллургического производства Навошанского металлургического завода (НМЗ) Норильска и позволяет использовать имеющиеся на заводе резервы оборудования.

Личный вклад автора выразился в непосредственном проведении исследований, выполнении термодинамических расчетов, а также в обработке полученных результатов и представлении решений на их основе.

**Апробация работы.** Основное содержание работы докладывалось автором на конференции молодых специалистов АО "Институт Гидрометалл" 06.03.2002, а также на научных семинарах аспирантов, молодых специалистов и научных сотрудников в ОАО "Институт Гидрометалл".

**Публикации.** Основное содержание работы изложено в 4 научных публикациях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, списка литературы. Работа изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 25 рисунков, 18 таблиц.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы.

**Первая глава.** Проведен анализ литературных данных о химизме и механизме процесса, протекающего при окислительно-восстановительных фазовых составах медного концентрата и при гидротермальном взаимодействии сульфидов с раствором  $SuSO_4$ . Рассмотрены различные технологии рафинирования при гидрометаллургической переработке медно-никелевых фаялитовых и медных концентратов. На основе литературного обзора сформулированы цели и задачи проводимых исследований.

**Во второй главе** показан составительский и химический состав концентратной пробы медного концентрата от флотационного разделения фаялитов, предоставленной Загорным Филиалом ОАО "Горно-Металлургическая Компания «Норильский никель» (ЗФ ОАО "ГМК «Норильский никель»). По данным химического анализа медной концентрат содержит: 65,4% Cu, 1,5%Ni, 3,9%Fe, 0,28%Co и 21,6%S.

Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что основной фазой в медном концентрате является низкотемпературный кубический диселенит. Также присутствует в виде включений, а железо – в виде борнита и небольшого количества магнетита.

Третья глава посвящена разработке технологии рефинирования Cu концентрата с целью снижения в нем содержания никеля и железа до менее 0,5% каждого и изучению закономерностей процессов, протекающих при гидротермальной обработке.

По литературным сведениям получение медного остатка с требуемым содержанием никеля возможно лишь при температуре  $-200^{\circ}\text{C}$ , а заданное содержание железа не достигается даже при таких высоких температурах.

Несмотря на большое количество исследованной, оставшейся недостаточно изученными темой и основным поведением Ni и Fe в условиях гидротермального взаимодействия сульфидов с  $\text{CuSO}_4$ .

Прежде чем приступить к разработке технологии, представляло интерес проверить возможность прямого рефинирования медного концентрата по технологии, разработанной доктором технических наук Соболевым С.И. для комбината "Североникель", и заключающейся в гидротермальной обработке концентрата раствором медного купороса.

Результаты опытов подтвердили данные других исследователей - прямое рефинирование не обеспечивает получения кондиционного медного продукта, особенно по Fe.

Дальнейшие исследования проводили по схеме окислительно-выщелачивания концентрата – гидротермальная обработка (ГТО). Изучение закономерностей окислительного выщелачивания проводили в атмосферных условиях в стальной реакторе при подаче в трубку кислорода или воздуха. Реактор был снабжен электродом для измерения pH. Перемешивание осуществлялось открытой турбинкой мешалкой при скорости вращения 450 об/мин. Все опыты проводили при Ж:Т=7:1 и расходе кислоты – 240 кг/т Cu концентрата. Продолжительность опытов определялась временем достижения pH 2,1, т.е. дальнейшее повышение pH раствора приводило к гидролизу железа и получению после ГТО загрязненного железом концентрата. Полученную сульфату подвергали гидротермальной обработке при постоянных условиях (при  $150^{\circ}\text{C}$ ) с целью установления предельной возможности получения Cu концентрата необходимого качества.

Проведенные эксперименты показали, что с повышением температуры с 20 до  $85^{\circ}\text{C}$  скорость выщелачивания никеля и железа (рис.1, б, в), хотя и незначительная, но возрастает, а зависимость скорости перехода в раствор меди от температуры имеет аномальный характер – с повышением температуры скорость процесса замедляется (рис.1, а).

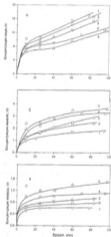


Рисунок 1. Выщелачивание меди (а), никеля (б) и железа (в) из медного концентрата при различных температурах,  $^{\circ}\text{C}$ :  
1 - 45; 2 - 55; 3 - 65; 4 - 75; 5 - 85.

Для объяснения этого явления следует учитывать снижение растворимости кислорода в водном растворе с понижением температуры, а также то, что наряду с реакцией растворения меди:



одновременно идут обычные реакции:



По-видимому, в условиях недостаточной аэрации пульпы кислородом процесс выщелачивания протекает в диффузионном режиме и повышение температуры в большей степени ускоряет обычные реакции (3) и (4), нежели реакция растворения (1) и (2). Следствием этого и является аномальный характер зависимости скорости перехода меди в раствор от температуры.

Можно было предположить, что с повышением интенсивности аэрации зависимость скорости перехода меди в раствор от температуры приобретет обычный характер. Эксперименты подтвердили это предположение.

Исследования показали также, что применение в качестве окислителя воздуха, а не кислорода оказывается только на увеличении продолжительности атмосферной стадии в несколько раз и не влияет на качество получаемого концентрата. Выбор окислителя может быть определен с экологической точки зрения.

В результате окислительного атмосферного выщелачивания Cu концентрата и последующей гидротермальной обработки его при 150°C не удалось получить медный остаток требуемого качества - содержание Ni и Fe составляло не менее 0,7-0,9% каждого.

Установлено, что радикальным средством получения высококачественного медного концентрата является повышение температуры ГТО до 170-175°C, позволяющее снизить содержание никеля в концентрате до 0,27-0,31%, а железа до 0,24%.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали возможность рафинирования медного концентрата по схеме атмосферное окислительное выщелачивание - гидротермальная обработка с получением кондиционного медного остатка.

В дальнейших исследованиях с целью интенсификация процесса выщелачивания меди была проверена возможность рафинирования медного концентрата с за-

метной атмосферной стадией на автоклаву. Оказалось, что этот вариант не дает каких-либо преимуществ по качеству получаемого концентрата, а в аппаратурном оформлении значительно сложнее. Поэтому в дальнейшем это направление в работе не изучалось.

На следующем этапе была подробно изучена кинетика и химия процессов, протекающих при гидротермальной обработке.

Общепринятые представления о химизме ГТО относятся к реакции:



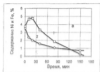
Однако, детальное изучение показало, что процессом Ni и Fe при ГТО сложнее.

Для кинетических исследований были применены 2 метода: проводились автоклавные опыты с медленным нагревом пульпы, где процессы гидротермального взаимодействия раствора сульфата меди с твердой фазой начинались задолго до достижения рабочей температуры опыта, и с быстрым нагревом - с подлей активной части жидкой фазы (раствора  $\text{CuSO}_4$ ) через мембрану, что позволило прервать контакт твердую фазу и медьсодержащий раствор только после достижения в автоклаве заданной температуры.

В ходе исследований выявилось две особенности, связанные с поведением никеля и железа.

Первая из них состояла в том, что независимо от способа нагрева в начальный период процесса из раствора осаждалось значительное количество железа. Видно (рис.3 б, кривая 1), что кривая перехода железа в раствор имеет экстремальный характер. В начальный период рафинирования концентрата железа в растворе снижается, однако, далее железо вновь переходит в раствор, и в конце рафинирования содержание железа в твердой фазе снижается до 0,1-0,2 % (рис.3 а и 4 а, кривая 1). По мере протекания процесса концентрация никеля в растворе растет, а меди - снижается (рис.3 б, кривая 1,3)

Вторая особенность заключается в том, что содержание никеля в твердой фазе в опытах с применением мембраны стабилизировалось на уровне 0,7-0,8 % (рис.3 а, кривая 2), тогда как в аналогичных опытах с медленным нагревом пульпы (рис.4 а, 2) содержание никеля снижалось до 0,3-0,4%.

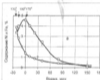


а - содержание Fe(1) и Ni(2) в твердой фазе;



б - изменение концентрации  $H_2SO_4$ (1), Fe(2) и Cu(3) в растворе

Рисунок 3. Кинетика рафинирования медного концентрата (подложка красного раствора  $CuSO_4$  через мембрану). Температура  $175^{\circ}C$ .



а - содержание Fe(1) и Ni(2) в твердой фазе; б - изменение концентрации  $H_2SO_4$ (1), Fe(2) и Cu(3) в растворе.

Рисунок 4. Кинетика гидротермальной обработки медного концентрата (мембранный нагрев сульфата). Температура  $175^{\circ}C$ .

Анализ литературных данных, а также дополнительные исследования позволили объяснить поведение железа. В литературе высказывается предположение о возможности окисления железа полами меди. Так, по мнению профессора Набойченко С.С. процесс развивается по реакции (7), а в patente США №5903314 (1999 г.) предлагается образование одновалентной меди (реакция 8), которая при температуре ниже  $130^{\circ}C$  диспропорционирует с образованием металлической меди:



Однако результаты наших исследований показали, что в условиях начального периода ГТО реакционноструктурно наиболее благоприятствует дегидрат и гематит, тогда как металлическая медь, а также возможные продукты ее окисления отсутствуют. Это позволило заключить, что реакция (7), если и протекает, то в очень незначительной степени и не может объяснить образование заметных количеств железа.

На наш взгляд, процесс развивается по следующей схеме:



При  $x=0,2$ :



Медь (2+) окислила железо, восстанавливаясь до одновалентной формы дегидрат. Железо при этом подвергается оксидгидрату.

Очевидно, что для протекания реакции окисления железа (10) необходимо присутствие в твердой фазе ковеллина. Остатки атмосферного окисления в значительной степени состоят именно из этого соединения. Предложенная схема окисления железа, не претендуя на объяснение механизма процесса, объясняет результаты предыдущих исследований -  $CuS$ , образованный путем обычного взаимодействия  $CuSO_4$  с сульфидом, присутствовал как в опытах С.С. Набойченко, так и в опытах, представленных в патенте США, где гидрометаллургической переработке подверглась окислительная  $Cu-Ni$  фальштейн, где присутствие  $CuS$  при рафинировании тем более неизбежно.

Возвращаясь к кинетике гидротермальной обработки медного концентрата, видно, что вслед за кратковременным повышением содержания железа в твердой фазе следует снижение его содержания. Это объясняется не только протеканием основной реакции (5) между сульфидом железа и медным сульфидом, но и восстановлением в растворе меди окисленного железа:



Выполненный термодинамический анализ окисления железа 2+ ионами меди и ковеллином и восстановления гидроксидов железа ковеллином (рис. 3,6) показал, что реакция окисления термодинамически возможна в растворе, близком к нейтральному, тогда как реакция восстановления, напротив, а возможна в растворах. Видно также, что ковеллин выполняет двойственную роль: в первый период процесс медь ковеллином является окислителем железа, а во второй - сере  $CuS$  восстанавливает окисленное железо.



Рисунок 5. Зависимое pH на термодинамическое равновесие реакции (10).

Полуреакции:



Таким образом, на основании предложенного механизма и термодинамических расчетов можно сделать вывод, что поведение железа при ГТО, помимо его взаимодействия по обменной реакции (5), определяется возможным протеканием реакции окисления (10) и восстановления железа (11). В начальный период проноса, когда в растворе высокая концентрация ионов Cu и небольшая кислотность, процесс окисления железа (10) более вероятен, чем реакция 11, что приводит к осаждению железа. В завершающей период, по мере снижения концентрации ионов Cu и повышения кислотности преобладающей становится реакция восстановления (11) и Fe обратно переходит в раствор.

Полученные результаты также позволяют объяснить причину незначительного удаления железа, наблюдающегося в работах предыдущих исследователей, которым при прямом рафинировании Cu концентрата кислыми растворами сульфата меди, не удавалось получить продукт с содержанием железа менее 1-2% даже при температуре 200°C. Собыль С.Н. объяснил это образованием еще в процессе хвращения концентрата ускорного железа. Однако оставалось непонятно, почему железо хвращения не восстанавливается и не растворяется даже при 200°C в присутствии большого количества сульфидов. Термодинамические расчеты показали, что восстановление  $Fe_2O_3$  термодинамически возможно как ковеллином, так и дисульфидом и халькопиритом. Но в результате исследований было установлено, что железо хвращения не восстанавлива-



Рисунок 6. Зависимое pH на термодинамическое равновесие реакции (11).

Полуреакции:



ется присутствующим в концентрате халькопиритом даже при высоких температурах ГТО, по-видимому, из-за низкой активности этого сульфида. Восстанавливать железо хвращения в условиях автоклавной обработки может только активный ковеллин, образующийся на первой стадии, который является в количественном отношении более реакционно-способным по сравнению с  $Cu_2S$  и  $Cu_2S$ . Поэтому можно заключить, что преимущественное участие ковеллина в восстановлении гематита объясняется скорее кинетическим фактором, а не термодинамической.

Для дополнительного подтверждения этого высказывания были проведены опыты по прямому рафинированию с добавкой к исходному концентрату искусственно полученного ковеллина или остатка атмосферной стадии, содержащего ковеллин. Содержание железа в этих опытах удалось снизить до менее 0,5%, что подтверждает предположение о восстановлении железа хвращения ковеллином.

Таким образом, были не только объяснены результаты других исследователей, но и показана возможность прямого рафинирования с целью снижения содержания железа в конечном медном концентрате, путем подкисления к медному концентрату ковеллина или ковеллинсодержащего материала. Благодаря этому оксидные формы железа при рафинировании восстанавливаются и железо переходит в раствор.

Поведение Ni при ГТО сложное и сильно зависит от скорости нагрева твердой фазы.

Для объяснения причины повышенного содержания никеля в опытах с быстрым нагревом твердой фазы остатки гидротермальной обработки были подвергнуты рентгеноструктурному микроанализу, результаты которого показали, что сульфидная никелевая фаза сильно обогащена серой не только по сравнению с  $Ni_3S_2$ , но даже по сравнению с NiS. Это можно свидетельствовать об образовании углеродного соединения  $Ni_3C_4$ .

Для прямого доказательства образования полидимета в гидротермальных условиях были проведены опыты по обработке в воде при 150-170°C остатка атмосферного выплавляемого Cu концентрата в кока, полученного в результате автоклавного окислительного выщелачивания (АОВ) медно-никелевого медноколчеданного фаялитов. В обоих продуктах, подвергнутых ГТО, вновь присутствовал в виде NiS, а медь в виде дисульфида и ковеллина, но в коке АОВ Cu-Ni фаялитовый содержание никеля было в несколько раз выше, чем в медном остатке, что должно было

повысить достоверность результатов. Результаты PCA получены после ГТО при подтверждении, что в процессе гидротермальной обработки образуется осадок.

Таким образом, в настоящей работе впервые был предложен и осуществлен синтез  $Ni_3S_2$  путем окисления  $NiS$  в присутствии медносернистых сульфидов в бескислородных условиях. Процесс avviene адт с заметной скоростью при температуре шиде 130°C, при температуре 170°C превращение завершается в течение нескольких минут.

В отсутствие кислорода образование осадков в чистой воде идет по реакции твердофазного превращения для протекания которой складываются благоприятные условия – зерна ковалента и миллерита находятся в тесном контакте:



При гидротермальной обработке, когда в растворе присутствуют ионы меди, осадки также могут принимать участие в окислении миллерита:



Обладая лучшими размерами медных результатов, можно прийти к выводу, что в процессе ГТО часть миллерита превращается в осадок, химическая упорность которого, по-видимому, является причиной полного удаления никеля из медного концентрата, в особенности при быстром нагреве пульпы.

При медленном нагреве пульпы атмосферного выщелачивания в отсутствие раствора  $Cu_2SO_4$  рафинирование от никеля (по реакции 4) усиливает в основном профит при относительно невысоких температурах, при которых переход  $NiS$  в  $Ni_3S_2$  еще не происходит, и содержание  $Ni$  в твердой фазе снижается до требуемых значений.

При подходе через осадок твердой фазы, осадок, попадая в зону высокой температур, претерпевает быстрый нагрев и значительная часть  $NiS$  успевает перейти в угорный  $Ni_3S_2$ , в результате чего в осадке остается повышенное количество никеля.

Таким образом, образование осадков необходимо учитывать при разработке аппаратного оформления гидротермального рафинирования. Для достижения кондиционных содержаний никеля в конечном концентрате должна быть организована поэтапный нагрев пульпы до рабочей температуры ГТО.

В четвертой главе выполнено математическое моделирование атмосферного окислительного выщелачивания и гидротермальной обработки  $Cu$  концентрата с использованием математической модели, разработанной в Гапоннике. Экспери-

ментально найдены кинетические параметры выщелачивания. Определены кинетические функции окислительного выщелачивания меди, а также растворения никеля и железа при ГТО. С помощью математической модели выполнены расчеты по выбору оборудования, свидетельствующие о том, что для атмосферного выщелачивания пригодны выщелачиватели на ИМД 3-4 реактора окисления емкостью 80м<sup>3</sup>, а для гидротермальной обработки – 4 горизонтальных автоклава объемом 120м<sup>3</sup>.

В пятой главе представлены в описании технологии рафинирования медного концентрата, разработанной по результатам проведенных исследований и позволяющая получить высококачественный медный продукт, пригодный для плавки в печи Вакуума (рис.7). Аппаратурная схема представлена на рис. 8.



Рисунок 7. Принципиальная технологическая схема рафинирования медного концентрата УРФ





6. Выполнено математическое моделирование атмосферной стадии и гидротермальной обработки. На основании экспериментальных данных определены кинетические параметры процесса.
7. С помощью математических моделей рассчитана аппаратурная схема процесса, в основе которого лежит использование технологий на ЗФ ОАО "ТМК "Норильский никель" оборудования. Выполнены расчеты свидетельствуют о том, что линия аппаратов, состоящая из 3-4-ех реакторов емкостью 80 м<sup>3</sup> для атмосферного выщелачивания и 4-ех горизонтальных автоклавов емкостью 125 м<sup>3</sup> для ГТО, позволяет перерабатывать до 300-400 тыс. т медного концентрата в год при остаточном содержании никеля и железа в концентрате не выше 0,5%.
8. Технико-экономический расчет по совершенствованию ГМП НМЦ с применением автоклавного рафинирования медного концентрата показал, что ожидаемый экономический эффект составит -11 млн USD.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Чугаев Л.В., Баранкина Н.А., Шварцов Я.М. Особенности поведения никеля и железа при автоклавном рафинировании медных концентратов от флотационного разделения медно-никелевых фаяллитовых. //Химическая технология. - 2003. - №12. - С.24-29.
2. Чугаев Л.В., Баранкина Н.А., Шварцов Я.М. Разработка технологии рафинирования медных концентратов от флотационного разделения медно-никелевых фаяллитовых. // Химическая технология. - 2003. - №12. -С.18-24.
3. Вадворная Е.М., Шварцов Я.М., Жмарин Е.Е., Чугаев Л.В., Баранкина Н.А. Математическое моделирование технологии рафинирования медных концентратов от флотационного разделения медно-никелевых фаяллитовых.// Химическая технология. - 2004. - №1. -С. 19-23.
4. Чугаев Л.В., Баранкина Н.А., Шварцов Я.М. Гидротермальное рафинирование медного концентрата от флотационного разделения медно-никелевых фаяллитовых. // Цветные металлы. - 2004. - №12. - С.87-90.

Лицензия ЛР №020593 от 07.08.97

Подписано в печать 27.05.2005. Формат 60x84/16. Печать офсетная.  
Уч. печ. л. 1,0. Тираж 500. Заказ 240.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,  
в типографии Издательства Политехнического университета.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29.