

## ОТЗЫВ

официального оппонента по диссертации Русалева Ростислава Эдуардовича на тему: «Гидрометаллургическая технология переработки Au-Sb сульфидных концентратов Олимпиадинского месторождения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 - Metallургия черных, цветных и редких металлов.

### Общая характеристика работы

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, 3 приложений. Работа изложена на 105 страницах, содержит 37 рисунков и 39 таблиц. Список использованной литературы включает 105 источников. Имеются ссылки как на работы отечественных, так и зарубежных ученых.

*Во введении* автором обоснована актуальность и степень разработанности темы диссертации, сформулирована цель работы, указана ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, определены задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, и положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* представлен анализ имеющихся литературных данных по современному состоянию золотодобывающей промышленности, мирового рынка сурьмы, приведен обзор способов переработки золотосурьмяных руд в зависимости от типа руды и присутствующих в ней примесей. Проведен критический анализ известных азотнокислотных технологий вскрытия золотосодержащих сульфидов, на основе которого сформулированы задачи исследования.

*Во второй главе* диссертации обсуждаются физико-химические закономерности процесса сульфидно-щелочного выщелачивания сурьмы.

Рассмотрены вопросы предотвращения гидролиза сульфид-ионов, а также растворения золота в виде комплексных тиосульфатных соединений, построен центральный композиционный план с тремя изменяемыми параметрами. Результаты извлечения сурьмы в раствор обобщены в виде поверхностей отклика. Рекомендованы параметры ведения процесса сульфидно-щелочного выщелачивания при которых извлечение сурьмы составило 97,6 %.

**В третьей главе** приведены результаты переработки кеков сульфидно-щелочного выщелачивания. Изучен фазовый и химический составы обессурьмянного кека. Проведена термодинамическая оценка поведения соединений железа и мышьяка в азотной кислоте посредством построения диаграмм Пурбэ. Полученные результаты математического планирования эксперимента в виде полных полиномов позволили оценить вклад каждого фактора в эффективность процесса выщелачивания и провести расчет извлечения железа и мышьяка в раствор. Рекомендованы параметры процесса: в соответствии с которыми в укрупненных лабораторных исследованиях извлечение железа и мышьяка в раствор составило 98 и 92,2 % соответственно

**В четвертой главе** приведены результаты исследования кинетики азотнокислотного выщелачивания железа и мышьяка из декарбонизированного кека. Получены полиномиальные зависимости степени извлечения железа и мышьяка от времени при концентрации азотной кислоты 10 и 40 %. В ходе кинетического анализа установлено, что в процессе азотнокислотного выщелачивания декарбонизированного кека реакции растворения протекают во внутридиффузионной области.

**В пятой главе** приведены результаты укрупнённых испытаний и предложена технологическая схема, в которой можно выделить 2 основных цикла: получение металлической сурьмы и золотосодержащего остатка, пригодного для цианирования. Предложена аппаратурная схема, спецификация основного технологического оборудования, рекомендуемого к использованию. Проведена предварительная технико-экономическая оценка проекта создания цеха по переработке золотосурьмяных концентратов Олимпиадинского

месторождения производительностью 25 тыс. т/год. Экономические расчеты показали, что ежегодная прибыль до вычета налогов составит 1 075 890 долл. США/год.

*В приложениях* приведены изображения реакторов для сульфидно-щелочного и азотнокислотного выщелачивания, материальный баланс переработки флотационного концентрата Олимпиадинского месторождения, акт о проведении укрупненных опытов гидрометаллургической переработки золото-сурьмяного концентрата на опытном участке ООО «Химмаш-Инжиниринг» (г. Екатеринбург).

*В заключении* представлены общие выводы по результатам проведенных исследований, сформулированные в виде 9 пунктов, отражающих содержание проделанной работы и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

По структуре и объему работа соответствует требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертация написана грамотным научным языком, хорошо оформлена. В конце каждой главы имеются отдельные выводы. В целом представленная работа характеризуется последовательностью изложения и внутренним единством, содержит весь необходимый материал для понимания не только существа, но и деталей исследования. Полученные результаты отвечают поставленным целям и задачам. Автореферат диссертационной работы и опубликованные работы достаточно **полно** отражают ее содержание. В целом, представленная автором диссертационная работа **соответствует** паспорту специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время во всем мире становится актуальной проблема истощения запасов высококачественного сырья цветных и благородных металлов. В результате в переработку вовлекают различные первичные и техногенные низкосортные полиметаллические материалы, в том числе такие,

как мышьяк- и сурьмосодержащие концентраты, упорные золотосодержащие руды и т.д. Сложности при переработке подобных низкосортных материалов возникают в связи с их упорностью, заключающейся в увеличении доли материалов с тонкой и эмульсионной вкрапленностью сульфидов меди, цинка, железа, мышьяка, сурьмы и пр. друг в друге и в минералах пустой породы, содержании наряду с ценными компонентами токсичных элементов. В настоящее время нет разработанных и внедренных технологий, которые включали бы извлечение не только целевых, но и сопутствующих компонентов, получение продукции из токсичных соединений и их утилизации. Переработка такого сырья по существующим технологиям нерентабельна вследствие низкого содержания основных компонентов и сложности их разделения. С научной точки зрения приобретает особую актуальность создание новых инновационных процессов и технологий применительно к полиметаллическому сырью с комплексным решением проблем извлечения ценных компонентов и создания новых материалов на их основе, что позволит сделать переработку подобных материалов экономически и экологически выгодной.

В связи с этим, работа Р.Э.Русалева, имеющая целью разработку и научное обоснование гидрометаллургической технологии переработки золотосурьмяного концентрата Олимпиадинского месторождения с селективным выделением сурьмы в готовый продукт и получением богатого золотосодержащего остатка, пригодного для аффинажа, является вполне актуальной.

### **Научная новизна**

Среди основных результатов, составляющих научную новизну работы можно выделить следующее:

1. Установлены условия эффективного ведения процесса сульфидно-щелочного выщелачивания Олимпиадинского концентрата, обеспечивающие высокое извлечение сурьмы с одновременной минимизацией потерь золота с растворами.

2. Предложен новый способ вскрытия упорных сульфидных золотосодержащих минералов в сульфатно-нитратных растворах при  $Eh \geq +0,7$  В и  $pH < 7$ , обеспечивающий сокращение расхода азотной кислоты и выхода элементной серы.

3. Впервые установлены кинетические характеристики реакций азотнокислотного выщелачивания Fe и As из сульфидных золотосодержащих минералов и показано, что процесс растворения данного сырья в исследуемых условиях переходит из смешанного режима во внутридиффузионный, что связано с образованием элементной серы на поверхности обрабатываемого вещества.

### **Степень обоснованности научных положений и выводов и практическая ценность работы**

В представленной работе автору удалось решить технологическую проблему – обосновать гидрометаллургическую технологию переработки золотосурьмяного концентрата. Для решения этой задачи автору пришлось изучить составы и морфологию золотосурьмяного концентрата Олимпиадинского месторождения и образующихся полупродуктов на каждой стадии разрабатываемой технологии; провести термодинамический анализ поведения соединений сурьмы в сульфидно-щелочных растворах и определить условия её максимального селективного извлечения; выявить физико-химические особенности азотнокислотного вскрытия кеков сульфидно-щелочного выщелачивания сурьмы и декарбонизированных кеков; определить параметры процесса, обеспечивающие максимальное вскрытие золотосодержащих сульфидов; изучить кинетические закономерности и выявить особенности механизма азотнокислотного выщелачивания обессурьмяненных золотосодержащих сульфидных материалов.

Многосторонность исследования потребовала использовать различные исследовательские методы: рентгенофлуоресцентный, атомно-абсорбционный анализ, рентгенофазовый, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой, пробирный анализ, электронно-микроскопический и др. Применены

методы математического планирования эксперимента и компьютерные программы обработки информации и сбора данных. Автор работы не только ориентируется в методических особенностях использованных методов, но и корректно интерпретирует результаты исследований.

**Достоверность** и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы сомнений не вызывает, так как они базируются на фундаментальных представлениях физической и неорганической химии и не противоречат известным сведениям в этой области знаний.

**Практическое значение работы** заключается в том, что по результатам исследований определены параметры ведения процессов сульфидно-щелочного и азотнокислотного выщелачивания золотосурьмяных концентратов, обеспечивающие высокое селективное извлечение сурьмы, пониженный расход азотной кислоты, увеличение степени сквозного извлечения золота. Это позволило разработать технологию комплексной переработки золотосурьмяных концентратов Олимпиадинского месторождения, включающую стадии селективного выделения металлической сурьмы и получения золотосодержащего остатка, пригодного для аффинажа. Эффективность технологии была проверена на ООО «Химмаш-Инжиниринг», где в ходе укрупненных испытаний извлечение сурьмы в раствор составило 96,1 %, последующее азотнокислотное растворение обессурьмяненных кеков позволило перевести железо и мышьяк в раствор на 97 и 89 %, а извлечение золота в цианистый раствор составило 90,5 %.

**Апробация работы** проведена в достаточной мере. Основные научные результаты, полученные автором диссертации, достаточно полно отражены в 17 публикациях, в том числе в 7 публикациях в рецензируемых изданиях, рекомендованных Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, результаты диссертации докладывались на ряде международных конференций, получен патент на изобретение РФ.

#### **Замечания по содержанию работы**

При анализе диссертационной работы Русалева Р. Э. возникли

следующие **вопросы и замечания**:

1. Каким образом удастся избежать загипсовывания пульпы при сернокислотной декарбонизации кека?
2. Оптимизация параметров сульфидно-щелочного выщелачивания как-то повлияла на процесс последующего электролиза сурьмяных растворов?
3. Чем обусловлен выбор температуры в 50<sup>0</sup>С для проведения процесса сульфидно-щелочного выщелачивания исходного флотационного концентрата?
4. В каком виде переходят в раствор азотнокислого вскрытия мышьяк и железо? Какие реакции с их участием проходят?
5. Какие отходы образуются в процессе переработки золотосурьмяного концентрата, их состав, куда они направляются? Куда направляется содержащий мышьяк и железо продукт?

Высказанные замечания не снижают, впрочем, общего положительного впечатления о диссертационной работе.

### **Предложения по расширенному использованию**

Результаты работы могут представлять интерес для специалистов, работающих в области переработки сульфидных золото-сурьмянистых концентратов, получения золота и производства металлической сурьмы, в частности, в ООО «УГМК-Холдинг» (Технический университет УГМК), НИЦ «Гидрометаллургия», Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Санкт-Петербургском горном университете, Забайкальском государственном университете (Чита), Научно-исследовательском центре ТОО «КазГидроМедь» (Казахстан). В практическом применении результатов работы могут быть заинтересованы предприятия цветной металлургии, такие как предприятия ТОО "Корпорации «Казахмыс»" (Казахстан), холдинг «АРМЗ» (АО «Атомредметзолото»), НПЦ “Электрум” (Новосибирск), ОК РУСАЛ, ОАО «Иргиредмет» (Иркутск), ООО «Новоангарский обогатительный комбинат».

### **Заключение**

С учетом актуальности выбранного направления, научной обоснованности, новизны технических разработок, а также их значения для создания технологии переработки золотосурьмяного сырья, можно сделать вывод, что диссертационная работа Русалева Р. Э. является законченной научно-квалификационной работой и **отвечает требованиям** к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, определённым п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», утверждённый приказом ректора от 21 октября 2019 г. № 879/03, а её автор, Русалев Р. Э., **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией химии гетерогенных процессов  
ФГБУН Институт химии твердого тела УрО РАН, д.т.н.

Сабирзянов Наиль Аделевич

620990, г.Екатеринбург, ул. Первомайская, 91,  
e-mail: [sabirzyanov@ihim.uran.ru](mailto:sabirzyanov@ihim.uran.ru),  
тел.(343) 362-34-61

26.02.2021

Подпись Сабирзянова Н.А. заверяю.  
Уч. секретарь ИХТТ УрО РАН, к.х.н.

Е.А. Богданова