



*На правах рукописи*

**БОБОЗОДА Шавкат**

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА  
ЦИАНИРОВАНИЕМ СМЕШАННЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТАДЖИКИСТАНА**

Специальность 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Научный руководитель:

Стрижко Леонид Семенович  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Седельникова Галина Васильевна

доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Центральный научно-  
исследовательский геологоразведочный  
институт цветных и благородных  
металлов» (ФГУП ЦНИГРИ), г. Москва,  
заместитель директора по научной работе

Лобанов Владимир Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина» (ФГОУ ВО «УрФУ  
им. имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина), г. Екатеринбург, доцент  
кафедры металлургии цветных и редких  
металлов

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Иркутский национальный  
исследовательский технический  
университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»), г.  
Иркутск

Защита диссертации состоится «21» февраля 2017 г. в 00 аудитории К-212 на заседании диссертационного совета Д 212.132.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Крымский вал, д. 3.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС» и на сайте [www.misis.ru](http://www.misis.ru).

Отзывы на автореферат отправлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 4, НИТУ «МИСиС», ученому секретарю диссертационного совета Лобовой Т.А.  
Автореферат разослан « » декабря 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Лобова Т.А.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Извлечение золота цианированием является весьма совершенным технологическим способом, позволяющим в промышленных условиях извлекать до 98-99 % золота. Однако цианидный процесс является длительным, что обусловлено низким содержанием растворенного в растворе кислорода и скоростью перемешивания, определяющих кинетику выщелачивания.

В зависимости от вещественного состава золотосодержащего сырья и характера распределения золота в руде длительность процесса выщелачивания цианидом в промышленных условиях колеблется от 24 до 100 часов и выше. При извлечении золота из упорных к цианированию руд, каковыми являются смешанные руды месторождения Бургунда (Таджикистан) продолжительность процесса составляет более 70 часов. Это приводит к нерациональному увеличению производственных площадей, расхода электроэнергии и других затрат, вследствие чего возрастают себестоимость получаемого продукта. Поэтому проблема интенсификации процесса цианирования является актуальной.

Актуальность работы подтверждается выполнением ее в рамках следующих проектов:

1. НИОКТР – «Технология комплексного извлечения благородных и цветных металлов из бедных и упорных золото-медьсодержащих руд месторождений Южного Урала» в рамках постановления Правительства Российской Федерации № 218 от 09.04.2010 г. при поддержке проекта № 02.G25.31.0075.

2. Соглашение о сотрудничестве между Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» и Министерством промышленности и новых технологий Республики Таджикистан от 01.07.2015 г.

**Цель работы.** Разработать технологию извлечения золота из смешанных руд месторождения Бургунда, предусматривающую последовательное

измельчение руды в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке, что позволяет существенно сократить длительность процесса и повысить эффективность производства.

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

- изучить вещественный состав смешанной золотосодержащей руды месторождения Бургунда;
- изучить влияние условий гидроакустической обработки (продолжительность, давление подачи раствора, степень разрежения) на степень насыщения щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воды кислородом;
- изучить взаимосвязь между составом оборотных вод и живучестью пузырьков воздуха;
- изучить влияние параметров последовательного измельчения (продолжительность, pH среды, концентрация кислорода и циан-иона) в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке, на измельчаемость руды и степень извлечения золота;
- разработать технологию переработки смешанной руды месторождения Бургунда, предусматривающую последовательное измельчение руды в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке.
- провести опытно-промышленные испытания разработанной технологии извлечения золота из руд месторождения Бургунда на ООО СП «Апрелевка» (Таджикистан).

**Методы исследования:** минеральный состав изучен оптическим методом на установке «AXIO Imager» A1/M1 (Германия), элементный рентгеноспектральный микроанализ выполнен на установке «Superprobe-8100» (Jeol, Япония), минералогический анализ минералов выполнен на установке MLA 650 (FEI Company, Австралия), рентгенофазовый анализ выполнен на установке ARL 9900 Workstation IP3600 (Япония), размер пузырьков

определяли лазерным интерференционным, основанным на регистрации изображения частиц в рассеянном излучении лазера с помощью цифровой видеокамеры, концентрация растворенного кислорода измерялась с помощью оксиметра марки EXTECH (Тайвань), щелочность раствора определяли pH - метром.

Химический анализ на содержание золота выполняли на плазменном оптическом эмиссионном спектрометре ICP-OES, с применением атомно-абсорбционного спектрофотометра AA-7000 (Япония).

### **Научная новизна работы:**

1. Установлена причинно-следственная связь между живучестью пузырьков воздуха не кавитационной природы в объеме раствора и концентрацией солевых ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде проявляющаяся в том, что с увеличением концентрации ионов уменьшается скорость подъема пузырьков, вследствие чего создается избыточное давление в объеме раствора, которое препятствует выделению растворенного кислорода в атмосферу.

2. Установлен эффект роста концентрации циан-иона в оборотной воде в процессе её гидроакустической обработки, обусловленный тем, что под воздействием акустических колебаний происходит разрушение цианидных комплексов тяжелых цветных металлов в соответствии с константой их нестойкости.

### **Практическая значимость работы.**

1. Разработан новый способ переработки смешанных золотосодержащих руд, включающий последовательное измельчение в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке с последующим сорбционным выщелачиванием активным углем. Извлечение золота только на стадии рудоподготовки составляет 63,4 % (Патент РФ № 2579858, опуб.10.04.2016 г.).

2. На ООО СП «Апрелевка» проведены полупромышленные испытания предложенной технологии извлечения золота из смешанных руд месторождения Бургунда, в результате которых извлечение золота составило

63,2 % - на стадии рудоподготовки, и 83,2 % – при последующем сорбционном выщелачивании соответственно; прирост извлечения по сравнению с процессом прямого цианирования составляет 15,4 %. Расчет предполагаемого экономического эффекта от использования предложенной технологии по данным предприятия составит 9 долларов на тонну руды.

**На защиту выносятся:**

- результаты изучения вещественного состава руды месторождения Бургунда;
- результаты исследований взаимосвязи между химическим составом оборотных вод и живучестью пузырьков воздуха;
- результаты исследований влияния степени насыщения щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воды кислородом (продолжительность, pH среды, концентрация кислорода, концентрация циан-иона) на измельчаемость руды и степень извлечения золота;
- результаты опытно-промышленных испытаний разработанной технологии извлечения золота из смешанных руд месторождения Бургунда.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на международных научно – практических конференциях: «Теоретические и практические вопросы науки XXI века» (Уфа, 2014 г.); «Естественные и технические науки: опыт, проблемы, перспективы» (Ставрополь, 2015 г.); «Science, Technology and Higher Education» (Вествуд, Канада, 2014); «Science and Education» (Мюнхен, Германия, 2014 г.); «Global Science and Innovation» (Чикаго, США, 2014 г.)

**Публикации.** Основное содержание работы опубликовано: в периодической печати – 9, из них в журналах, рекомендуемых ВАК – 8; в сборниках тезисов докладов – 5; всего печатных работ – 14; патент – 2.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 149 страницах, содержит 24 таблиц, 40 рисунков, 94 использованных источников и 6 приложений.

## **Основное содержание работы**

Во введении приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель работы и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведен аналитический обзор опубликованных теоретических и практических работ, посвященных современному состоянию способов переработки золотосодержащих руд. Отмечено, что до настоящего времени основным промышленным способом извлечения золота из руд является выщелачивание цианидом, позволяющее извлекать до 98-99 % золота. Однако данный метод имеет сравнительно низкую эффективность вследствие низкого содержания кислорода в пульпе и скоростью перемешивания, определяющих кинетику выщелачивания.

Рассмотрены существующие способы интенсификации процесса выщелачивания золота из руд и концентратов, такие как цианирование с ультразвуковым воздействием, в цикле измельчения, в присутствии реагентов – окислителей (смесью органических и неорганических солей натрия и нитрата свинца) и насыщением кислородом пульп. Отмечено, что применение первых двух способов направлены на повышение скорости перемешивания при измельчении и цианировании, но не способствуют повышению концентрации растворенного кислорода в пульпе и сокращению длительности процесса выщелачивания. Показано, что при использовании реагентов-окислителей в процессе выщелачивания происходит окисление свободного циан-иона, что приводит к увеличению расхода цианида. Отмечено, что среди перечисленных способов, наиболее перспективным является разработанный в НИТУ МИСиС и запатентованный способ извлечения золота из руд цианированием с применением гидроакустической обработки для насыщения пульпы кислородом, который позволяет существенно сократить длительность процесса. Однако, применение гидроакустической обработки ограничивается тем, что из-за высокой абразивности пульпы происходит быстрое изнашивание излучателя.

Исходя из вышеизложенного, высказана научная идея о возможности интенсификации процесса извлечения золота из смешанных руд путем

измельчения в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке.

В то же время, применимость предложенной технологии к золотосодержащим рудам в первую очередь зависит от состава сырья, формы нахождения золота и его минералов-носителей, а также от технологических свойств исследуемой руды, что требует проведения дополнительных исследований.

**Во второй главе** приведены результаты исследований вещественного состава руды месторождения Бургунда.

По данным химического анализа основными компонентами руды являются  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  составляющие в сумме 79,4 %, в подчиненных количествах присутствуют  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{S}_{\text{общ}}$  с содержанием 0,77 и 2,8 %, соответственно. Содержание остальных компонентов менее 1 %. Вредными компонентами являются медь и мышьяк, составляющие 0,32 и 0,07 %, соответственно.

По данным минералогического анализа основными породообразующими минералами руды являются кварц, карбонаты, серицит, мусковит, глинистые минералы и хлориты, составляющие в сумме 72,71 %, в значительно меньших количествах присутствуют полевые шпаты. Среди первичных рудных минералов преобладают сульфиды железа, мышьяка и меди, составляющие 7,24 %. Вторичные рудные минералы представлены гидроксидами и сульфатами железа, малахитом и азуритом.

Ценным компонентом в руде является золото, содержание которого составляет более 3 г/т. Показано (таблица 1), что около 56 % золота находится в виде извлекаемого цианированием, а в сульфидах (рисунок 1) - 30,8 %.

Таблица 1 – Распределение золота в смешанной руде месторождения Бургунда

№ п/п	Форма нахождения золота в пробе	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
1.	Свободное золото	0,04	1,2
2.	Золото в открытых сростках	1,38	55,5
3.	Золото в сульфидах (пирит, арсенопирит)	0,92	30,8
4.	Золото в кварце и минералах, нерастворимых в кислотах	0,36	12,2
	Итого	3	100

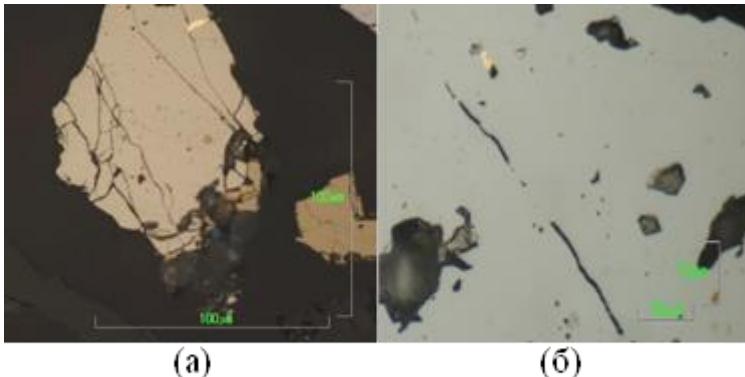


Рисунок 1 – Золото включенное в пирите (а) и арсенопирите (б)

Исследованиями по обогатимости установлено, что данная руда относится к категории упорных руд к цианированию.

**В третьей главе** приведены результаты физико-химических исследований

извлечения золота последовательным измельчением в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке.

Одним из недостатков известных способов насыщения кислородом растворов под давлением (до 5 атм.) является тот факт, что концентрация растворенного кислорода после выхода раствора из аппарата резко падает. Известно, что это связано с перепадом давления кислорода над раствором, вследствие которого растворенный кислород стремится к своей равновесной концентрации, соответствующей данному значению давления (атмосферное давление). В связи с этим было выдвинуто предположение о том, что можно предотвратить выделение растворенного кислорода из раствора созданием избыточного давления в объеме раствора за счет образования долгоживущих пузырьков, имеющих высокое внутреннее давление. В этой связи представляется весьма перспективным использование гидроакустических излучателей, разработанных сотрудниками НИТУ «МИСиС», которые обладают свойством не только растворять кислород воздуха, но и диспергировать его в жидкости на мельчайшие пузырьки.

На основе практики применения гидроакустических излучателей был выбран наиболее эффективный по конструктивным особенностям однолучевой гидроакустический излучатель «веерного» типа, способный создавать колебания в широком диапазоне частот и интенсивности с использованием которого создана лабораторная установка (рисунок 2.).

Гидроакустический излучатель 1 представляет собой цилиндрическую резонаторную камеру, в которую струя раствора, сжимаясь и расширяясь,

поступает с помощью насоса 2. Затем струя раствора приобретает угловую скорость в резонаторной камере и образует вихревой поток, вследствие которого создается разрежение. Это обстоятельство явилось предметом подачи кислорода воздуха в зону разрежения с помощью штуцера 3, соединенного с излучателем, где происходит растворение и диспергирование кислорода воздуха за счет знакопеременных давлений. Исходя из этого, были проведены исследования по изучению влияния давления подачи раствора в гидроакустический излучатель на концентрации растворенного кислорода в дистиллированной и оборотной воде (рисунок 3).

Полученные данные позволили установить экстремальный характер увеличения концентрации растворенного кислорода до  $\sim 16 \text{ мг}/\text{дм}^3$  при давлении подачи от 4 до 6 атм. Дальнейшее увеличение давления до 7 атм. приводит к резкому уменьшению концентрации кислорода в растворе и степени разрежения в резонаторной камере (таблица 2).

Это обусловлено тем, что вихревое движение в резонаторной камере гидроакустического излучателя нарушается вследствие уменьшения скорости потока струи раствора. В то время следует отметить, что при давлении 6,5 атм. степень разрежения достигает максимума, в то время как растворимость кислорода начинает падать (см.рисунок 3). Предположено, что при этом значении давления подачи раствора (6,5 атм.) начинается процесс

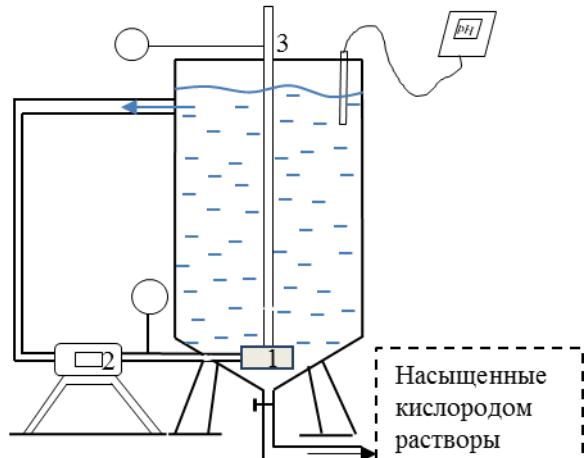


Рисунок 2 – Лабораторная установка

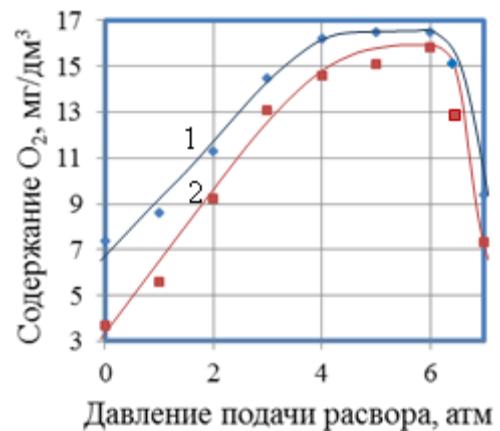


Рисунок 3 – Влияние давления подачи на концентрацию растворенного кислорода в: 1 – дистиллированной воде; 2 – оборотной воде

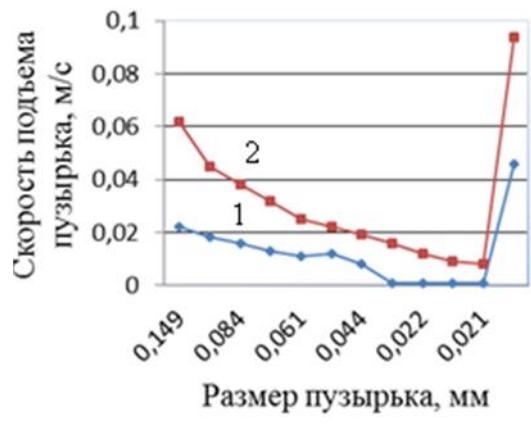
Таблица 2 – Влияние давления подачи раствора на степень разрежения

№ п/п	Давление подачи, атм	Степень разрежения, кгс/см <sup>2</sup>
1.	5	0,57
2.	6	0,57
3.	6,5	0,58
4.	7	0,35

дегазации, т.е. интенсивность акустических колебаний возрастает. Вследствие этого растворенный кислород выделяется в атмосферу, а мелкие пузырьки объединяются в крупные, которые быстро поднимаются на поверхность.

Для определения размера и живучести образующихся в объеме раствора при гидроакустической обработке пузырьков воздуха, проведены исследования по изучению скорости подъема пузырька в дистиллированной и оборотной воде в зависимости от его размера.

Установлено (рисунок 4), что наибольшей живучестью обладают пузырьки воздуха, имеющие размер менее 0,035 мм, которые, преимущественно образуются в интервале давлений подачи раствора 4,5÷6 атм. При этом отмечено, что скорость подъема пузырьков воздуха в дистиллированной воде выше, чем в оборотных водах. Это может быть объяснено тем, что в оборотной воде присутствуют солевые ионы ( $\text{Na}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$ ) которые, прочно связываясь с молекулами воды, образуют гидратные ансамбли, с ростом концентрации которых увеличивается плотность раствора (таблица 3).



Зависимость скорости подъема пузырька от его размера в: 1 - оборотной воде; 2 - дистиллированной воде

Таблица 3 – Влияние солевых ионов на скорость подъема пузырька

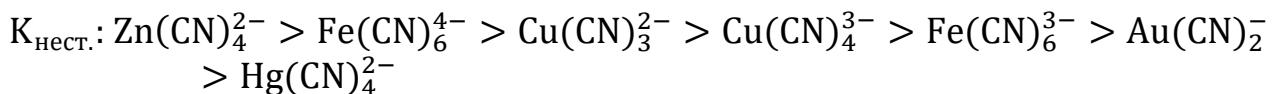
№ п/п	Стандартный ион содержащий раствор	Концентрация ионов, г/л		Скорость подъема, см/с
		$\text{Na}^+ \pm 5 \text{ мг}$	$\text{Mg}^{2+} \pm 5 \text{ мг}$	
1.	$\text{Na}^+$ - растворы	0,5	8	11,8
2.	$\text{Na}^+$ - растворы	7	8	4,3
3.	$\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ - растворы	0,5	20	2,3
4.	$\text{Na}^+ + \text{Mg}^{2+}$ - растворы	7	40	<1

В свою очередь, с повышением плотности раствора возрастает сила сопротивления среды и как следствие уменьшается скорость подъема пузырьков. На основе данных рабочих параметрах гидроакустического излучателя с использованием известного уравнения Сиротюка проведены расчеты по определению природы образующихся пузырьков. Установлено, что полученные пузырьки вследствие большого поверхностного натяжения становятся не кавитационной природы.

Наличие долгоживущих в объеме раствора пузырьков воздуха создает избыточное давление, которое препятствует выделению растворенного кислорода из раствора в атмосферу.

В ходе исследований замечено, что при накислороживании оборотных вод (химический состав, мг/дм<sup>3</sup>: Fe – 78,5; Cu – 46,4; Zn – 12,7; Hg – 4,5; Au < 0,001; pH – 8,1) происходит увеличение концентрации циан-иона в обрабатываемом растворе. Экспериментально подтверждено, что это связано с разрушением цианидных комплексов цветных металлов и железа, содержащихся в оборотных водах в поле гидроакустического воздействия (рисунок 5).

Установлено, что разрушение цианистых комплексов в поле акустических колебаний происходит в соответствии с их константой нестойкости в следующем порядке:



Таким образом, наиболее благоприятными условиями процесса насыщения раствора кислородом и разрушения цианидных комплексов, содержащихся в оборотной воде, до циан-иона, является давление подачи раствора во входное устройство гидроакустического излучателя 4÷6 атм.

Исследования влияния pH среды, отношения Ж:Т (принято как в действующем производстве) и концентрации растворенного кислорода на продолжительность процесса, измельчаемость руды и извлечение золота при последовательном измельчении в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке проводили по следующей схеме (рисунок 6).

Установлено (таблица 4, рисунок 7а), что с повышением концентрации растворенного кислорода продолжительность измельчения на первой стадии сокращается с 82 до 45 минут с получением выхода готового класса -74 мкм, 50-55 %, при этом степень вскрытия золота увеличивается с 0,09 до 0,34. Это обусловлено тем, что в процессе измельчения в щелочной оборотной воде,

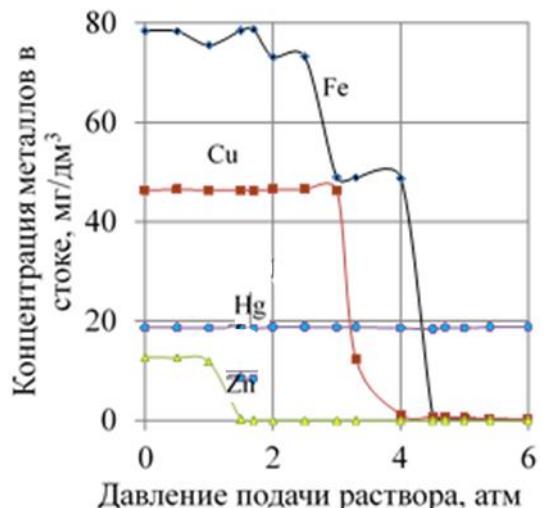


Рисунок 5 – Влияние давления подачи на изменение концентрации металлов в растворе

предварительно насыщенной кислородом происходит интенсивное окисление сульфидов минералов, содержащих вкрапленное золото, с образованием гидроксидов тяжелых металлов не растворимых в цианидных растворах.

Установлено аналогичное влияние концентрации кислорода на показатели измельчения в щелочно-циансодержащей оборотной воде предварительно насыщенной кислородом (таблица 4, рисунок 7б): продолжительность измельчения сокращается с 45 до 45 с получением выхода готового класса -74 мкм, 75-80 %, извлечение золота увеличивается с 27,3 до 63,4 %.

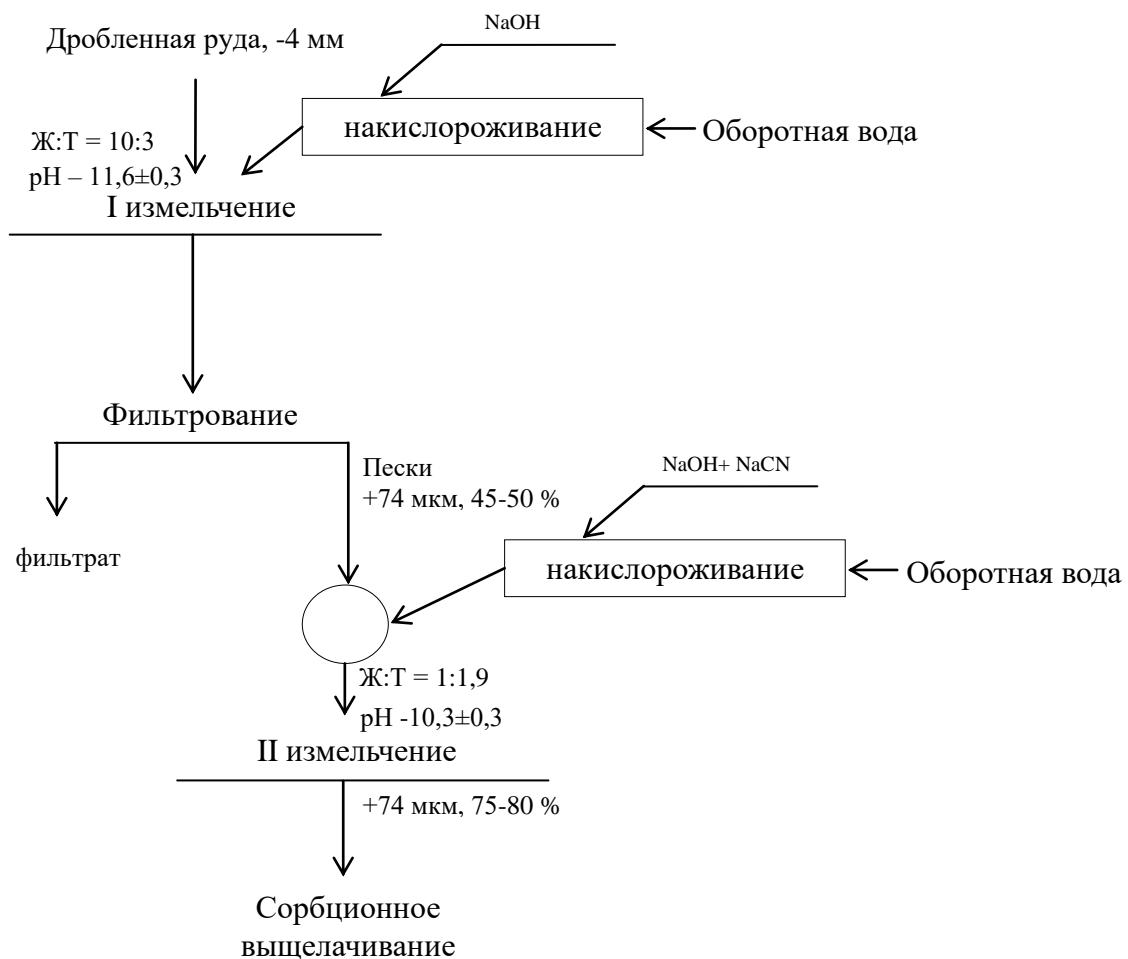


Рисунок 6 - Схема лабораторных исследований извлечения золота из смешанной руды месторождения Бургунда

Таким образом доказано, что последовательное измельчение руды в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке позволяет только на стадии рудоподготовки достичь извлечение золота 63,4 %.

Таблица 4 - Влияние концентрации  $O_2$  на продолжительность измельчения и извлечения золота

№ п/п	Концентрация $O_2$ , мг/дм <sup>3</sup>	Продолжит., мин	Выход класса -74 мкм, %	Степень вскрытия золота, д.е	Извлечение золота, %
<b>Первая стадия измельчения</b>					
1	3,7 (без накислороживания)	82	51,3	0,09	-
3	15,6	45	54,6	0,34	-
<b>Вторая стадия измельчения</b>					
1	3,7 (без накислороживания)	45	79,4	-	27,3
3	15,6	25	77,34	-	63,4

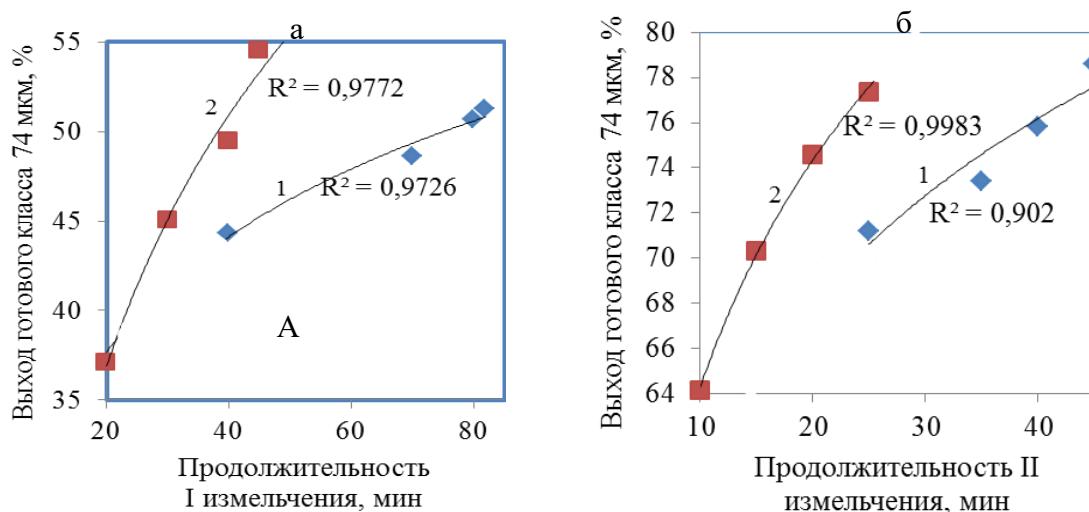


Рисунок 7 – Зависимость выхода готового класса 74 мкм от продолжительности измельчения: 1 – без накислороживания; 2 –  $O_2$ -15,6 мг/л

На основании результатов проведенных исследований выбраны следующие параметры процесса извлечения золота из руды: первая стадия: pH среды  $11,6 \pm 0,3$ , концентрация растворенного кислорода – 15,6 мг/дм<sup>3</sup>, отношение Ж:Т = 10:3, выход готового класса 74 мкм, 50-55%; вторая стадия: pH среды  $10,3 \pm 0,3$ , концентрация циан-иона на уровне 0,06 %, концентрация растворенного кислорода – 15,6 мг/дм<sup>3</sup>, отношение Ж:Т = 1:1,9 выход готового класса 74 мкм, 75-80 %.

**В четвертой главе** приведены результаты исследования кинетики растворения золота в процессе последовательного измельчения в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке.

Проведены кинетические исследования по изучению влияния концентрации циан-иона и температуры на степень извлечения золота при установленных ранее параметрах. Результаты представлены на рисунке 8.

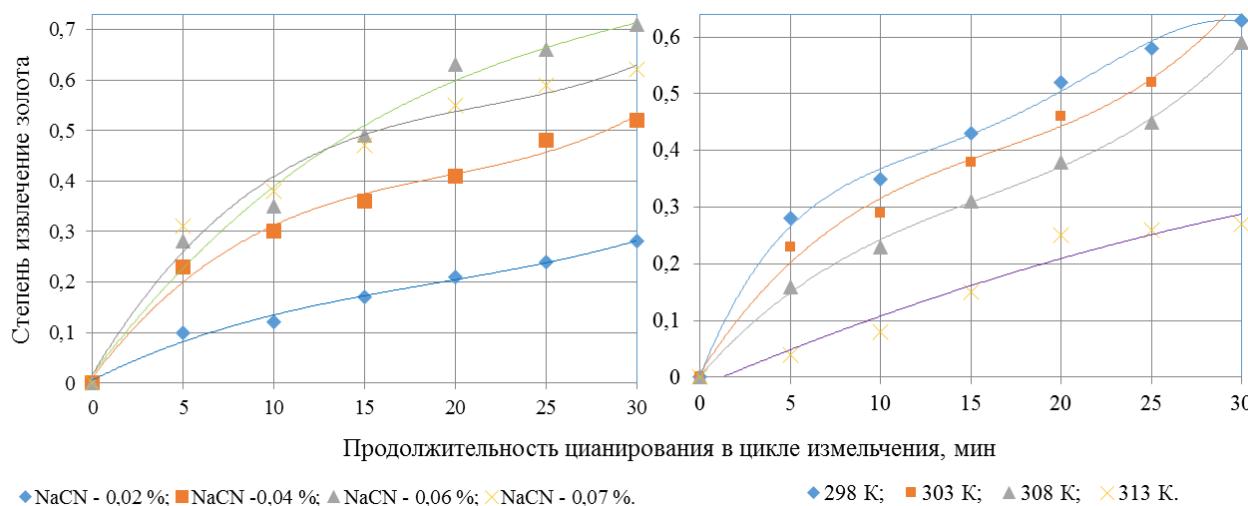


Рисунок 8 - Зависимость степени извлечения золота от продолжительности измельчения в щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом

Для определения порядка реакции по реагенту и значения энергии активации проводили обработку кинетических данных и соответствующие расчеты (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты расчета порядка реакции по концентрации цианида и значение кажущей энергии активации по температуре

№ п/п	Способы выщелачивания	Порядок реакции	Энергия активации, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$
1.	Измельчение в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом	$n = \operatorname{tg}\varphi = \frac{\Delta \ln \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}}{\Delta \ln C} = 0.43 < 1$	87,8

Полученные значения порядка реакции по концентрации цианида при постоянстве других параметров и энергии активации равное 87,8 кДж/моль свидетельствуют о том, что растворение золота при измельчении в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке, протекает в кинетической области. Следует отметить, что этому способствует предварительное окисление сульфидов на первой стадии измельчения и перевод их в нерастворимую форму, интенсивное перемешивание и высокие концентрации реагентов на поверхности выщелачиваемого металла.

**В пятой главе** приведены результаты полупромышленных испытаний по переработке смешанной руды месторождения Бургунда на действующей фабрике по предложенной технологии, включающей измельчение и цианирование в цикле измельчения с последующим сорбционным выщелачиванием с применением активированных углей (рисунок 9). Первая стадия измельчения проводилась полусамоизмельчением в мельницах МШР 2700-2100 при pH среды  $11,6 \pm 0,3$ , концентрации растворенного кислорода – 15,6 мг/л и отношении Ж:Т = 10:3 с получением готового класса 74 мкм, 50-55 %. Далее проводилось измельчение цианированием в мельницах МШР 3000-2100 и МШР 3500-2100 при pH  $10,3 \pm 0,3$ , отношении Ж:Т = 1:1,9 с получением выхода готового класса 74 мкм, 75-80 %. Результаты представлены в таблице 6.

Таблица 6 - Результаты полупромышленных испытаний измельчения в щелочно-циансодержащей оборотной воде

№ п/п	Концентрации $O_2$ , мг/дм <sup>3</sup>	Выход готового класса, - 0,074 мм, %	Концентрация циан-ион, %	Извлечение, %	
				Au	Ag
1.	Без накислороживания	76,60	0,001	13,42	9,81
2.			0,003	17,67	12,52
3.			0,004	17,71	15,51
4.	15,6	79,44	0,05	56,14	24,17
5.			0,06	62,20	24,12
6.			0,065	62,23	23,98

Полученные данные свидетельствуют о том, что процесс следует проводить при концентрации циан-иона - 0,06 % и концентрации растворённого кислорода - 15,6 мг/дм<sup>3</sup> при которых достигнута высокая степень извлечения золота – 62,2 %.

Слив гидроциклона «№ 4» (см. рисунок 11) после последовательного измельчения в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке направили на сорбционное выщелачивание для дорастворения золота и сорбции его из пульпы активированным углем. Результаты представлены в таблице 7.

Анализ данных показывает, что максимальная степень извлечения золота 83,2 % достигается при продолжительности выщелачивания 12 часов и загрузке сорбента на уровне 5 г/дм<sup>3</sup>.

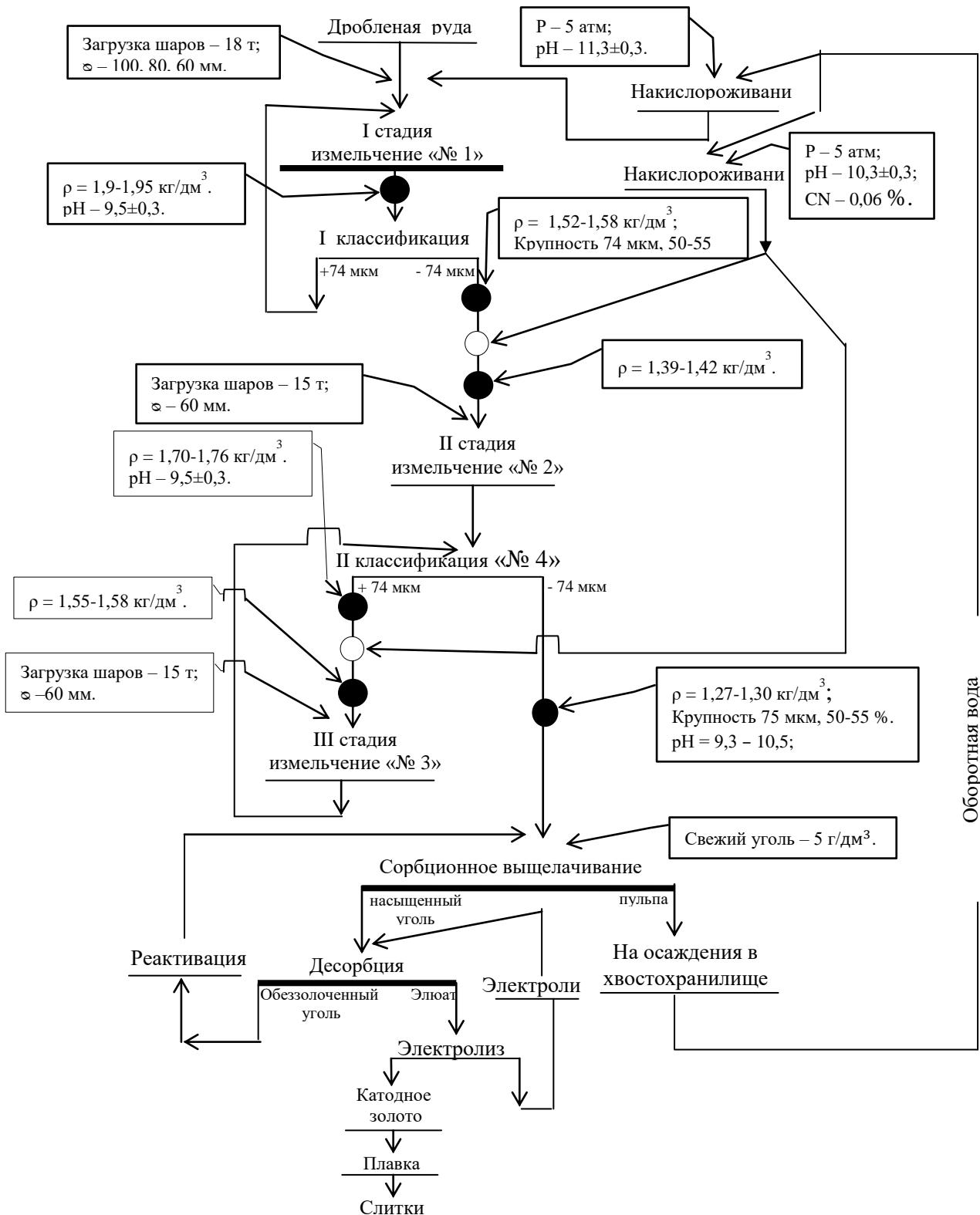


Рисунок 9 – Технологическая схема переработки смешанных руд месторождения Бургунда

По результатам полупромышленных испытаний предложена технологическая схема переработки смешанной руды месторождения Бургунда с контролируемыми параметрами введения процесса (рисунок 9).

Таблица 7 - Результаты полупромышленных испытаний сорбционного выщелачивания слива гидроциклона

№ п/п	Продолжит., ч	Загрузка угля, г/дм <sup>3</sup>	Содержание Au в		Извлечение, %	
			растворе, мг/дм <sup>3</sup>	кеke, г/т	Au	Ag
1.	8	3	<0,01	0,54	81,86	33,93
2.		5	<0,01	0,54	82,04	34,15
3.		10	н.о	0,54	82,10	34,17
4.	10	3	<0,01	0,52	82,60	34,51
5.		5	н.о	0,52	82,68	34,47
6.		10	н.о	0,52	82,67	34,53
7.	12	3	<0,01	0,50	83,17	34,63
8.		5	н.о	0,50	83,18	34,68
9.		10	н.о	0,51	83,09	34,65
10.	14	3	<0,01	0,51	83,14	34,67
11.		5	н.о	0,50	83,20	34,57
12.		10	н.о	0,50	83,20	34,46

За период опытно-промышленных испытаний по данной схеме переработано 2000 тонн руды. Прирост извлечения золота по сравнению с действующей технологией составил 15,4 %. При этом объем переработки вырос с 600 до 750 тонн руды.

Экономический эффект от переработки руды по предложенной технологии за вычетом себестоимости составит 9 долларов на тонну руды.

## **Выводы**

1. Руды месторождения Бургунда – смешанные золотосодержащие, сложного вещественного состава, обусловленного многообразием вмещающих пород. Основными рудными минералами являются пирит и пирротин, вторичные рудные минералы представлены преимущественно карбонатами – малахитом, азуритом, редко оксидами и сульфидами. Основным ценным компонентом в руде является золото – 3 г/т, которое находится в открытых сростках (55,5 %), в сульфидах (30,8 %), в кварце и в минералах не растворимых в кислотах (12,2 %) и в свободной форме (1,2 %). По технологическим особенностям руда относится к категории упорных к цианированию.

2. Установлено, что измельчение в щелочной оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке способствует сокращению продолжительности с 82 до 45 минут с получением выхода готового класса 74 мкм, 50-55 %. При этом степень вскрытия золота увеличивается с 9 до 34 %.

3. Установлено, что измельчение в щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке с начальной концентрацией циан-иона на уровне 0,06 % и pH среды  $10,3 \pm 0,3$  способствует повышению извлечения золота с 27,3 % до 63,4 % и сокращению продолжительности с 45 до 25 минут с получением выхода готового класса – 74 мкм, 75-80 %.

4. На основе экспериментальных данных рассчитаны порядок реакции по реагенту и кажущаяся энергия активации, равная 87,8 кДж/моль свидетельствующие о том, что при начальной концентрации циан-иона на уровне 0,06 % и температуре 298 – 303 К растворение золота при измельчении в щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке, протекает в кинетический области.

5. По результатам лабораторных исследований проведены полупромышленные испытания на ООО СП «Апрелевка» по предложенной

технологии переработки смешанной руды месторождения Бургунда. Показано, что предложенная технология позволит на стадии рудоподготовки, за счет последовательного измельчения в щелочной и щелочно-циансодержащей оборотной воде, предварительно насыщенной кислородом при гидроакустической обработке, довести извлечение золота до 62,2 %. При последующем процессе сорбционного выщелачивания данный показатель достигает 83,2 %.

Экономический эффект от переработки руды по предложенной технологии за вычетом себестоимости составит 9 долларов за тонну.

### **Основные материалы диссертации опубликованы в работах:**

1. Бобозода, Ш. Кинетика и механизм накислороживания оборотных вод при цианировании в цикле измельчения / Ш. Бобозода, Л. С. Стрижко, И. Р. Бобоев // Цветные металлы. - 2015. - № 3 (897). - С. 10-14.

2. Бобозода, Ш. Кинетика цианирования золотосодержащей руды в цикле измельчения при подаче насыщенных кислородом оборотных вод / Ш. Бобозода, Л. С. Стрижко, И. Р. Бобоев // Технология металлов. - 2015. - № 5. - С. 3-10.

3. Бобозода, Ш. Полупромышленные испытания технологии выщелачивания золота в цикле измельчения с применением гидроакустического излучателя / Ш. Бобозода, И. Р. Бобоев, Л. С. Стрижко // Цветные металлы. - 2016. - № 7 (883). - С. 32-38.

4. Бобозода, Ш. Управление процессом и прогнозирование выщелачивания сырья с применением гидроакустического излучателя / Ш. Бобозода [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2014. - № 4(24). - С. 115-122.

5. Бобозода, Ш. Прогноз и управление процессом цианирования золотосодержащего сырья с применением гидроакустического излучателя / Л. С. Стрижко, Ш. Бобозода, И. Р. Бобоев // Технология металлов. - 2015. - № 5. - С. 11-17.

6. Бобозода, Ш. Извлечение золота из золото-медьсодержащего сырья / Ш. Бобоева [и др.] // Цветные металлы. – 2014. – № 6. - С 37-41.
7. Бобозода, Ш. Выщелачивание упорных окисленных золотых руд, содержащих медь / И. Р. Бобоев, Ш. Бобозода, Л. С. Стрижко // Металлург. - 2015. - № 10. - С. 78-80.
8. Бобозода, Ш. Кинетические исследования сульфицирующего обжига удаления мышьяка скородита при переработке упорных окисленных золотосодержащих руд / Ш. Бобозода [и др.] // Цветные металлы. - 2015. - № 8. - С. 24-28.
9. Бобозода, Ш. Кинетические исследования аммиачно-цианидного выщелачивания золота / Ш. Бобозода [и др.] // Наука и Мир. - 2014. - Т. 1. - № 11 (15). - С. 49-52.
10. Bobozoda, Sh. Intensification method of treatment of the refractory gold flotation concentrate // Sh. Bobozoda [and atc.] / Materials of the V International Conference «Science and Education».– Munich (Germany). 27-28 february.– 2014.– vol. I.– P.85-91.
11. Bobozoda, Sh. Cyanidation in the crushing cycle at supply of the oxygenated reverse waters // Sh. Bobozoda, L.S. Strijko, I.R. Boboев / Materials of the VI International Research and Practice Conference «Science, Technology and Higher Education».– Westwood (Canada). 12-13 November.– 2014.– vol. II. – P.382-385.
12. Бобозода, Ш. Интенсификационный способ выщелачивания золота в цикле измельчения // Ш. Бобозода, Л. С. Стрижко, И. Р. Бобоев / Сборник статей Международной научно-практической конференции «Теоретические и практические вопросы науки XXI века». 28 Ноября 2014 г, г. Уфа. Ч. 2. - С. 26-28.
13. Bobozoda Sh. Physico-chemical basis of ammonia-cyanide leaching of refractory copper ores and concentrates // Sh. Bobozoda [and atc.] / Materials of the II International Conference «Global Science and Innovation».- USA (Chicago) 21-22 May.- 2014. vol. II.– P.120-125.

14. Бобозода, Ш. Предложение по интенсификации процесса кучного выщелачивания золотосодержащего сырья / Ш. Бобозода [и др.] / Сборник материалов I международной научно-практической конференции: «Естественные и технические науки: опыт, проблемы, перспективы». 6 Июня 2015 г. г. Ставрополь - С 52-55.

15. Пат. РФ № 2579858, МПК C 22B 11/08, В 22 F 9/04. Способ извлечения золота из руд [Текст] / Бобозода Ш. [и др.]; заявитель и патентообладатель НИТУ "МИСиС". - № 2014146688/02; заявл. 20.11.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10. – 7 с.

16. Пат. РФ № 2603411, МПК C 22B 11/08. Способ интенсификации процесса кучного выщелачивания золота из руд [Текст] / Бобозода Ш. [и др.]; заявитель и патентообладатель НИТУ "МИСиС". - № 2015129026/02; заявл. 17.07.2015; опубл. 27.11.2016, Бюл. № 33. – 7 с.