

На правах рукописи

**Дамбажав Оюун**

**ОТВЕДЕНИЕ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ БЕЗНАПОРНОГО ПОТОКА ПУЛЬПЫ  
(НА ПРИМЕРЕ СП " ЭРДЭНЭТ " МОНГОЛИИ)**

Специальность 05.23.16 –" Гидравлика и инженерная гидрология"

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт - Петербург - 2004

Работа выполнена на кафедре инженерных мелиораций,  
гидрологии и охраны окружающей среды ГОУ ВПО " Санкт - Петербургский  
государственный политехнический университет " и на Монголо-Российском  
совместном предприятии " Эрэнэт " ( Монголия)

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор **Михалев Михаил Андреевич**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор **Пантелеев Валерий Геннадиевич** ;  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник

**Трунков Геннадий Трофимович**

**Ведущая организация** –ЗАО "Механобр-инжиниринг"

Защита состоится " 09 " марта 2004г. в 16 – 00 часов  
на заседании диссертационного совета Д212.229.17  
при ГОУ ВПО " Санкт - Петербургский государственный политехнический  
университет " по адресу: 195251, Санкт - Петербург, Политехническая  
ул.,д. 29, гидрокорпус - 2 (ПГК), ауд.411.

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

Автореферат разослан " " февраля 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Орлов В.Т.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последние годы в мировой практике широкое распространение получила переработка старых хвостовых отвалов с целью извлечения содержащихся в них драгоценных, редких и цветных металлов, так как из-за несовершенства технологии извлечения полезных компонентов на обогатительных фабриках в хвосты текущей переработки неизбежно уходит часть этих компонентов.

Технико-экономическая оценка существующих методов извлечения в ряде случаев обнаружила целесообразность повторной переработки хвостов. Во многих странах разработаны национальные программы, предусматривающие переработку отвальных продуктов обогатительных предприятий, позволяющие использовать их в промышленности и строительстве, а также дополнительно получать содержащиеся в них ценные компоненты. Проблема повышения выхода минерального сырья на совместном Монголо-Российском предприятии "Эрдэнэт" актуальна. Достигнутый на предприятии "Эрдэнэт" уровень извлечения меди и молибдена нельзя считать удовлетворительным. Из-за несовершенства технологии измельчения рудосодержащей породы значительная часть медных минералов теряется в хвостах флотации в виде сростков, размер которых колеблется от 0.044 до 0.36мм. Существующие способы сепарации хвостовой пульпы для выделения этой фракции чрезвычайно сложны и энергоемки, не имеют достаточного теоретического обоснования. Методы расчета соответствующих промышленных установок нуждаются в дальнейшем совершенствовании.

В настоящей работе излагаются результаты исследований с целью научного обоснования задачи выделения из хвостов, получающихся в результате обогащения медно-молибденовых руд, рудоносных фракций, которые сегодня уходят в отвал (в хвостохранилище). Предполагаемое решение основано на использовании известного опытного факта, в соответствии с которым в пульпопроводах в слоях, примыкающих ко дну, перемещаются более крупные и тяжелые частицы. Далее в зависимости от того, где находится большее содержание рудоносного материала (в пульпопроводе ниже точки отбора, или в отводе), направить разделенную пульпу либо на дальнейшую переработку, либо в отвал. Для решения этой задачи были проведены исследования с реальной пульпой в открытом безнапорном лотке, смонтированном в главном корпусе предприятия "Эрдэнэт", в котором находится промышленный пульпопровод. Опыты проводились в соответствии с разработанной программой, необходимые расчеты выполнялись по специально созданной методике, анализы отбора проб были сделаны в Центральной исследовательской и Центральной химической лабораториях предприятия. Анализы позволили определить грансостав

проб и содержание в них металлов в зависимости от крупности частиц.

Целью работы является научное обоснование процесса выделения песковой фракции путем отвода части пульпы из придонных слоев потока при равномерном режиме через отверстие в дне безнапорного пульпопровода. Для реализации этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- ◆ обосновать методику расчета безнапорного пульпопровода (при равномерном движении пульпы) с отверстиями в дне для разделения пульпы на два потока с большим содержанием песковой фракции в потоке пульпы, уходящей через отверстие (в отводе);
- ◆ произвести расчет безнапорного экспериментального лотка для проведения опытов с отведением пульпы через донные отверстия;
- ◆ разработать методику проведения опытов, предусматривающую отбор проб в начале лотка и в отводе с проведением гранулометрического и химического анализа проб;
- ◆ провести исследования на экспериментальной установке с хвостовой пульпой коллективной флотации обогатительной фабрики комбината "Эрдэнэт";
- ◆ изучить результаты анализа проб с целью оценки эффективности предлагаемого метода отвода крупных частиц;
- ◆ оценить возможный ожидаемый экономический эффект от внедрения в производство предлагаемого метода разделения пульпы на фракции с учетом дополнительных затрат на создание линии доизвлечения полезных компонентов в отведенной части пульпы с большим содержанием песковой фракции.

Объектом исследования для изучения гидравлического способа разделения твердых частиц по фракциям в работе выбрана хвостовая пульпа обогатительной фабрики комбината "Эрдэнэт", направляемая после флотации методом гидротранспорта в хвостохранилище. Выбор объекта не случаен, так как именно сегодня вопрос переработки хвостов актуален и на Монголо-Российском совместном предприятии "Эрдэнэт".

Научная новизна работы включает следующие части:

- гидравлический метод определения параметров безнапорного лотка-пульпопровода с отверстием в дне для выделения из нижних слоев потока (при равномерном режиме) крупных фракций, содержащихся в пульпе;
- методика проведения исследований на изготовленном в соответствии с гидравлическими расчетами безнапорном лотке-пульпопроводе с отводом части пульпы через донное отверстие с целью увеличения содержания частиц крупных фракций в потоке пульпы, уходящей через отверстие;

- результаты исследований, позволяющие определить оптимальные параметры лотка-пульпопровода и режим течения пульпы в нем, при которых в донное отверстие уходит часть пульпы с большим относительным содержанием крупных частиц, чем в исходной пульпе до отвода.

Практическая ценность работы заключается в обосновании предложенного метода разделения хвостовой пульпы на два потока с помощью безнапорного лотка-пульпопровода с отверстием в дне, через которое в отвод уходит поток, содержащий крупные фракции в относительно большем количестве, чем в исходной пульпе. При этом предлагается для организации процесса извлечения полезных компонентов, находящихся в крупных фракциях, создать дополнительную линию доизвлечения с целью размола крупных фракций и последующей флотации. В работе доказана экономическая целесообразность предлагаемого способа доизвлечения полезных компонентов, которые сегодня уходят с хвостовой пульпой в отвал.

Следующие положения выполнены лично автором и выносятся на защиту.

1. Обоснование гидравлического метода определения параметров безнапорного лотка-пульпопровода с отверстием в дне для отвода из нижних слоев потока частиц крупных фракций.
2. Разработка методики проведения исследований.
3. Данные исследований гидравлических характеристик потоков, гранулометрического и химического анализов отборов проб пульпы.
4. Результаты обработки измерений потоков и анализов проб, представление их в безразмерном виде.
5. Анализ результатов исследований, основные выводы, доказывающие возможность использовать на практике предлагаемый способ разделения хвостовой пульпы.
6. Предварительная экономическая оценка целесообразности рассматриваемого способа доизвлечения ценных компонентов из хвостовой пульпы.

Достоверность и обоснованность результатов и выводов подтверждается данными исследований, полученных на полупромышленной лабораторной установке с хвостовой пульпой действующего комбината и в Центральной исследовательской и Центральной химической лабораториях предприятия "Эрдэнэт" при проведении анализов отбора проб, а также использованием статистических методов для обработки экспериментального материала.

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликованы 2 печатные работы; автор выступила с докладами на международной конференции "Акватерра", С.-Петербург, 2003 и на межвузовской научной конференции; С.-Петербург, СПбГУ, 2003.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 111 страниц машинописного текста, из них 44 рисунка, 4 таблицы, список использованной литературы, состоящей из 96 наименований, и приложения на 8 страницах.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследований, показана практическая значимость работы.

В первой главе дается обзор современного состояния теоретических и экспериментальных исследований процессов дополнительного извлечения полезных компонентов из хвостов. На основе обзора литературных источников можно сделать вывод о том, что существуют различные методы извлечения меди из хвостовых продуктов обогатительных предприятий. Описаны методы вывода песковой фракции с последующей переработкой на обогатительных фабриках "Артур", "Магна" (США), "Толедо" (Филиппины) и "Эль-Сальвадор" (Чили). В некоторых странах из хвостов флотации медных руд, наряду с медными минералами, дополнительно извлекают ценные неметаллические компоненты: каолин, барит и др. В Австралии расширяется переработка хвостовых отвалов на месторождении "Брокен Хилл", содержащих цинк, свинец, медь серебро. Также можно перечислить ряд других обогатительных фабрик таких, как "Булкер" (Морокко), "Клаймакс" (США), "Норс Брокен Хилл" (Австралия), в том числе и по производству доизвлечения золота из отвальных хвостов предприятий "ERGO" (ЮАР), "Timmins" (Канада), "ЕРОСК" (Австралия), Риддерский ГОК (Казахстан).

В отличие от зарубежных на фабриках Российской Федерации практика переработки отвальных хвостов не нашла должного распространения, несмотря на наличие большого количества хвостохранилищ.

При обогащении руд благородных и цветных металлов в виде отходов (хвостов) теряется от 10 до 40 % металлов, извлеченных из недр. Одновременно идет процесс загрязнения окружающей среды. В процессе эксплуатации обогатительных фабрик в течение десятков лет образуется хвостохранилища с весьма разнородным содержанием полезных компонентов как по глубине, так и по площади. Анализ отвальных хвостов действующих обогатительных фабрик показывает, что основные потери ценных компонентов связаны с классами крупности частиц размером более 0.1мм. Для доизвлечения металлов из крупных фракций наиболее часто применяется метод разделения пульпы по фракциям с помощью сепарации с последующим измельчением и флотацией. Слив отходов сепарации и хвосты флотации удаляются в хвостохранилище.

В работе приведены сведения об основных способах разделения частиц, содержащих в хвостовой пульпе, по фракциям. Известно большое количество гравитационных аппаратов различных конструкций, таких как: центробежные, конусные и винтовые сепараторы, отсадочные машины, концентрационные столы, шлюзы, конуса Рейхерта, сепараторы Бартлез-Мозли, концентраторы Бартлез-Кроссбелт, Кнелсон, Фалкон и др. Большая часть гравитационных аппаратов (тяжелосредные, винтовые и конусные сепараторы, отсадочные машины и др.) способна успешно перерабатывать материал крупностью более 100 мкм.

Между тем по результатам исследований Абальянца С.Х., Аксенова Н.И., Великанова М.А., Гегешидзе И.М., Дементьева М.А., Енбаева И.А., Кнорова В.С., Криля С.И., Леви И.И., Натишвили О.Г., Пантелеева В.Г., Печенкина М.В., Силина Н.А., Трункова Г.Т. и многих других известно, что при скорости движения пульпы, равной критической (незаиляющей), твердые частицы движутся во взвешенном состоянии. Из-за неоднородности распределения твердой фазы по крупности и плотности в нижних слоях потока перемещаются более крупные и тяжелые частицы. Таким образом, если сделать отвод части пульпы из нижней части пульпопровода, то в него уйдут частицы с большой массой, с большим содержанием частиц крупных фракций, чем в пульпопроводе до места отбора. Такого рода исследования разделения хвостовой пульпы на фракции были выполнены на напорных пульпопроводах Алмалыкской медной фабрики (Енбаев И.А. и др.). При этом получены опытные данные, свидетельствующие о целесообразности такого способа разделения пульпы. В нашей работе эта идея реализуется в безнапорном лотке, в котором течение пульпы при равномерном режиме происходит со скоростями близкими к критическим. Техническое решение и методика проведения опытов обладают рядом существенных отличий от аналогичных, которые имели место в случае напорного пульпопровода.

Во второй главе приводятся основные сведения о Монголо- Российском совместном предприятии “Эрдэнэт” и сформулированы цель и задачи исследований.

Монголо-Российское совместное горно-обогатительное предприятие “Эрдэнэт” работает с 1978г. Предприятие состоит из открытого рудника “Эрдэнэтийн-Овоо”, обогатительной фабрики и хвостохранилища долинного типа. Месторождение “Эрдэнэтийн-Овоо” является одним из крупнейших в мире месторождений медно-молибденовых руд. Разведенные запасы руды медно-молибденового месторождения “Эрдэнэтийн-Овоо” обеспечивают устойчивую работу предприятия в течение более 30 лет с объемом добычи и переработки 24-30 млн.т руды в год. Принятая на обогатительной фабрике СП “Эрдэнэт” схема переработки медно-молибденовых руд включает коллективную флотацию и разделение медно-молибдено-пиритного продукта на медный и молибденовый концентраты.

В настоящее время коллективная флотация проводится на трех секциях фабрики. Концентрат основной коллективной флотации насосами подается на перечистку (разделение). Концентрат контрольной флотации и хвосты перечистки после доизмельчения в мельницах поступают на промпродуктовую флотацию, осуществляемую во флотомашинах различных фирм России, КНР, США. Концентрат основной промпродуктовой флотации подается совместно с концентратом основной коллективной флотации на перечистку, а концентрат контрольной промпродуктовой флотации объединяется с концентратом контрольной коллективной флотации. Хвосты контрольной, коллективной и промпродуктовой флотации являются отвальными. Коллективный медно-молибдено-пиритный концентрат подвергается в последующем селективному выделению из него медного (25,5-27,0% меди) и молибденового (50-52 % молибдена) концентратов при сквозном извлечении из руды 84-85% и 35-40%, соответственно. Хвосты, представленные в основном пиритом, сбрасываются в отвал.

Хвосты коллективной флотации содержит 0,09 - 0,12% меди и до 0,01% молибдена. После всех операций флотации хвосты собираются по сборным желобам в хвостовой зумпф, по одному из трех магистральных пульповодов из стальных труб диаметром 1200 мм и длиной 4500 метров самотеком поступают на пульпонасосную станцию, далее насосом ГрТ8000/71 перекачиваются в хвостохранилище.

В коллективных хвостах крупные фракции имеют повышенное содержание меди. Основные потери меди на 49% сосредоточены в классе крупности более 0,1 мм. Содержание молибдена по классам крупности практически равномерное. Минералогический анализ хвостов коллективной флотации показал, что основные потери меди (55%) представлены халькопиритом в виде сростков с породными минералами в классах крупности более 0,08мм. На 45% потери меди представлены халькозином в виде свободных тонких зерен.

Для обоснования рассматриваемого метода нужны некоторые параметры пульпы, которые можно получить путем измерений и расчетов. В качестве исходных данных рассмотрим следующие: расход пульпы  $Q$ , ее плотность  $\rho_n$ , вязкость  $\nu_n$ , мутность  $\mu$  (относительное содержание твердой фазы в жидкой). Обычно в производственных условиях определяют мутность как относительное содержание по массе твердой фракции в жидкой:

$$\mu = \frac{V_m \rho_m}{V_g \rho_g}, \quad (1)$$

$$V_n \rho_n = V_m \rho_m + V_g \rho_g. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2)  $V_m, V_g, V_n$  – соответственно объем твердого материала, воды и пульпы,  $\rho_m$  – плотность твердой фазы,  $\rho_g$  – плотность воды.

$$V_n = V_\epsilon + V_m \quad (3)$$

Из (1) имеем:

$$\frac{V_m}{V_\epsilon} = \mu \frac{\rho_\epsilon}{\rho_m} \quad (4)$$

После преобразований находим

$$\rho_n = \rho_\epsilon \frac{\mu + 1}{1 + \mu \frac{\rho_\epsilon}{\rho_m}} \quad (5)$$

Для определения вязкости пульпы используем формулу Эйнштейна:

$$v_n = v_\epsilon \frac{\rho_\epsilon}{\rho_n} (1 + 2,5\mu), \quad (6)$$

где  $v_\epsilon$  – вязкость воды

Для дальнейших расчетов важно найти некоторые характеристики твердых частиц, содержащихся в пульпе, которые можно рассматривать как физические параметры. К ним относятся скорость, при которой частицы начинают трогаться в чистой воде (или неразмывающая), а также их гидравлическая крупность (скорость осаждения одиночной частицы в неподвижной чистой воде).

Скорость начала трогания (неразмывающая)  $v_0$  частиц, находящихся на дне потока чистой воды при равномерном режиме, определяется из зависимостей (Кумина Т.Д., Михалев М.А.).

$$v_0 = v_{*0} \sqrt{\frac{2}{\lambda}}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического трения,  $v_{*0}$  – динамическая скорость, отвечающая началу трогания частиц:

$$v_{*0} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_n}}, \quad (8)$$

где  $\tau_0$  – касательное напряжение на дне потока, под действием которого частицы приходят в движение. Для определения динамической скорости  $v_{*0}$  используем формулу

$$\text{Re}_* = \frac{v_{*0} \bar{d}}{v_\epsilon} = a Ar_d^n, \quad (9)$$

откуда имеем

$$v_{*0} = a Ar_d^n \frac{v_\epsilon}{\bar{d}}. \quad (10)$$

В формулах (9) и (10):  $\bar{d}$  – средний размер твердых частиц, содержащихся в пульпе;  $Re_*$  – динамическое число Рейнольдса;  $Ar_d$  – критерий Архимеда

$$Ar_d = \left(\frac{\rho_m}{\rho_e} - 1\right) \frac{g\bar{d}^3}{\nu_e^2}, \quad (11)$$

$g$  – ускорение силы тяжести.

Параметры  $a$  и  $n$  в формулах (9) и (10) зависят от крупности частиц несвязного материала. Если размер частиц находится в пределах  $0,1 \leq \bar{d} < 0,25$  мм, то это область гидравлически гладкого русла; в ней  $a = 0,502$ ;  $n = 0,35$ . Случаю  $0,25 \leq \bar{d} < 1,0$  мм отвечает переходная область, где  $a = 0,314$ ;  $n = 0,432$ . Если  $\bar{d} \geq 1,0$  мм, то это область квадратичного сопротивления, где  $a = 0,162$ ;  $n = 0,5$ . Каждый из перечисленных областей соответствует свой закон сопротивления – зависимость коэффициента гидравлического трения  $\lambda$  от определяющих параметров. В диссертации приводятся соответствующие зависимости для каждой области сопротивления.

Для определения гидравлической крупности частиц  $\omega_0$  воспользуемся зависимостью

$$Re_\omega = \frac{\omega_0 \bar{d}}{\nu_e} = \frac{Ar_d}{18 + 0,61 Ar_d^{0,5}}. \quad (12)$$

Отсюда получим:

$$\omega_0 = \frac{Ar_d}{18 + 0,61 Ar_d^{0,5}} \frac{\nu_e}{\bar{d}}. \quad (13)$$

Незаиляющая скорость потока  $v_k$  определяется по формуле В.С. Кнороза, который получил ее в результате исследований транспорта хвостовой пульпы в открытых лотках на предприятиях горнодобывающей промышленности.

$$v_k = v_0 + 11,1 \omega_0^4 \sqrt{\mu_0} \left(\frac{R}{d}\right)^{0,4}, \quad (14)$$

где  $\mu_0$  – относительная объемная мутность (относительное содержание твердой фазы в жидкой по объему)

$$\mu_0 = \frac{V_m}{V_e} = \mu \frac{\rho_e}{\rho_m} \quad (15)$$

Размеры лотка-делителя пульпы определяются расчетом в предположении, что движение пульпы в нем равномерное. В результате расчетов, принимая скорость движения воды в лотке равной незаиляющей (критической), необходимо определить расход пульпы, подаваемой в лоток  $Q$ , а также следующие характеристики лотка-делителя: уклон его дна  $i$ ,

длину  $L$ , площадь живого сечения  $\Omega$ , ширину  $b$ , глубину наполнения  $h$  (с ней связана высота боковых стенок лотка  $H$ ), гидравлический радиус потока  $R$ , используя формулы гидравлики:

$$R = h \cdot \beta / (\beta + 2); \quad \beta = \frac{b}{h}, \quad (16)$$

$$i = \lambda_{\kappa} \frac{v_{\kappa}^2}{2gR}, \quad (17)$$

где  $\chi$  – смоченный периметр,  $\beta$  – относительная ширина лотка-делителя,  $\lambda_{\kappa}$  – коэффициент гидравлического трения внутренних стенок лотка при движении в нем пульпы со скоростью  $v_{\kappa}$ .

В формуле (17) коэффициент  $\lambda_{\kappa}$  определяется режимом движения и высотой выступов шероховатости внутренней поверхности лотка  $\Delta$ . В диссертации приводятся соответствующие расчетные формулы для определения этого коэффициента.

Заметим, что вместо скорости  $v_{\kappa}$  может быть принята любая иная, удовлетворяющая условию:

$$v_{\kappa} > v > v_0. \quad (18)$$

В процессе проведения исследований возникает необходимость изменения скорости течения в пределах, определяемых зависимостью (18). В этом случае уклон лотка и его ширина заданы, необходимо найти расход пульпы и глубину наполнения лотка, соответствующие равномерному режиму. Кроме того, при проектировании экспериментальной установки, исходя из производственных возможностей и условий проведения опытов, уклон лотка приходится задавать заранее.

Здесь может быть несколько путей решения задачи. Можно, например, найти глубину наполнения и расход воды такие, чтобы скорость течения  $v$  удовлетворяла условию (18). Вначале задаемся глубиной наполнения лотка  $h$ , находим гидравлический радиус  $R$  (ширина лотка задана). Определяем коэффициент гидравлического трения  $\lambda_{\kappa}$ . После этого преобразуем зависимость (17) в формулу для определения скорости течения  $v$  (в формулу Шези).

$$v = \sqrt{\frac{2g}{\lambda_{\kappa}} Ri}. \quad (19)$$

Если полученная скорость удовлетворяет условию (18), то дальше можно определить расход пульпы, поскольку скорость ее движения и площадь живого сечения известны.

Длину рабочей части лотка  $L$  найдем при условии, что за время, необходимое пульпе для прохождения этой длины, частицы заданного размера, опускаясь со скоростью осаждения

(гидравлической крупностью), должны оказаться у дна лотка. Отсюда имеем

$$L = \frac{v}{\omega_n} h, \quad (20)$$

где  $\omega_n$  – скорость стесненного осаждения частиц. Последнюю найдем по формуле Ричардсона

$$\omega_n = \omega_{0p} (1 - \mu_0)^2,$$

где  $\omega_{0p}$  – гидравлическая крупность частиц размером  $d_p$ .

Третья глава посвящена описанию экспериментальной установки и исследованиям процесса разделения хвостовой пульпы. Для выполнения исследований в главном корпусе обогатительной фабрики предприятия "Эрдэнэт" был изготовлен железный лоток прямоугольного поперечного сечения. Лоток расположен на невысоких опорах с уклоном равным  $i = 0,0163$ . Ниже приводятся описание составных частей лотка, рабочая длина которого равнялась 18,1 м, поперечное сечение  $0,5 \times 0,7 \text{ м}^2$  (рис.1).

1. Труба с задвижкой для регулирования подачи пульпы в лоток; труба соединяется с трубой, выходящей из флотомашин.
2. Голова лотка состоит из двух частей: в прямоугольной части длиной 2 м установлена успокоительная решетка, за ней находится переходная часть длиной 1 м.
3. Лоток-пульпопровод.
4. Щитовой затвор в конце лотка для регулирования уровней воды.
5. Мерный водослив треугольного сечения для измерения расхода пульпы, уходящей из опытного лотка, внутри него расположена успокоительная решетка.
6. Передвижной мерный водослив трапецидального сечения для измерения расхода пульпы, уходящий через нижний отвод.
7. Отвод с задвижкой; в дне лотка в месте отвода имеется щель, ширина ее регулируется съемными пластинками.
8. Успокоительная решетка.
9. Короб для слива пульпы из лотка.

Опыты проводились в соответствии с методикой, изложенной выше; анализы отобранных проб пульпы были сделаны в Центральной исследовательской и Центральной химической лабораториях предприятия. Анализы позволили определить мутность, грансостав твердых частиц, средний размер частиц, содержание полезных минералов в зависимости от крупности частиц и общее содержание полезных минералов в пробе. Опыты состояли из 4-х серий.

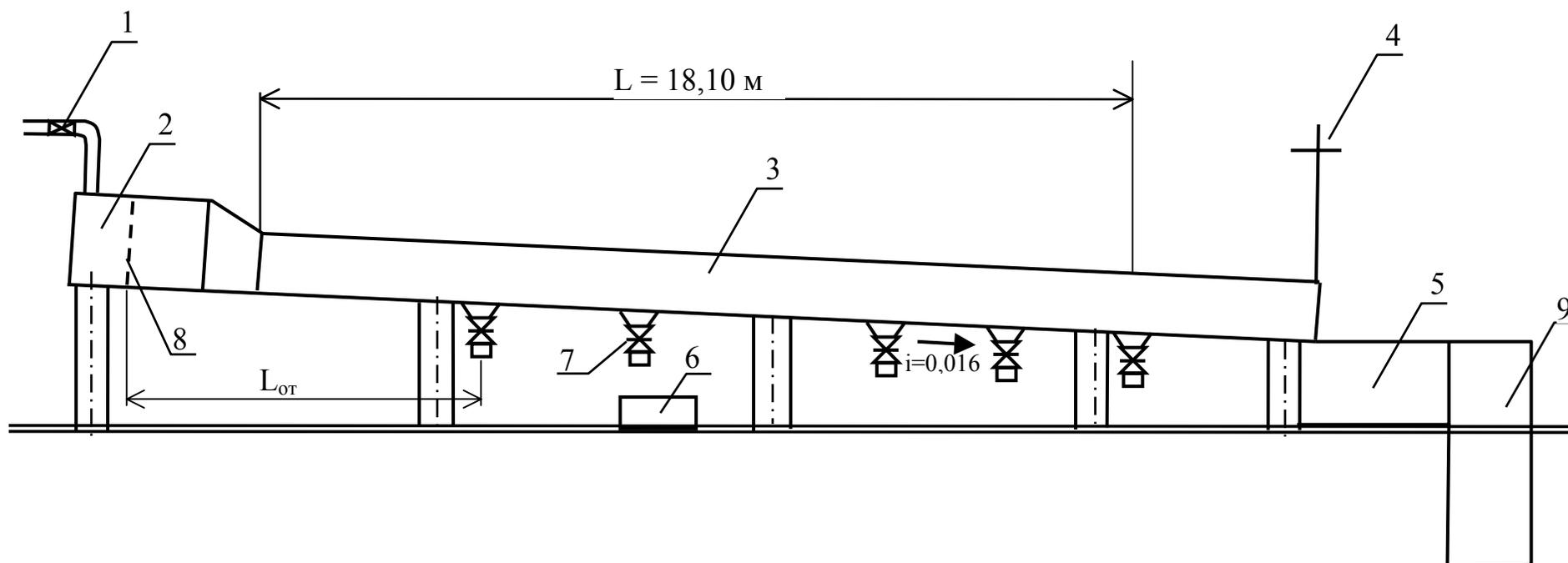


Рис.1 Схема экспериментальной установки

Первая серия опытов ставила перед собой цель проверить соответствие режима движения пульпы в лотке расчетному при условии отсутствия осаждения твердых частиц на дне лотка по всей его длине. Для этого отборы проб пульпы были осуществлены в начале и в конце лотка. После проведения анализов сравнивались результаты. Одновременно после завершения подачи пульпы в лоток визуально определялось наличие в нем на дне отложений.

Вторая серия состояла из 5-ти опытов, в которых отборы проб осуществлялись на разных расстояниях от начала лотка. В каждом опыте брали пробы пульпы в начале лотка и в отводе. Опыты были выполнены с целью определения оптимального расстояния расположения отвода от начала лотка.

Третья серия опытов состояла из 5-ти опытов с отводом пульпы через отверстие в дне лотка, расположенное на оптимальном расстоянии от начала лотка. Ширина отверстия регулировалась с помощью металлических вставок. Целью этой серии опытов было определение оптимальной ширины щели в отводе, через которую можно выводить максимальное количество твердых частиц крупных фракций.

Четвертая серия состояла из 3-х опытов, с отводом пульпы через отверстие в дне лотка при течении с небольшим подпором перед отводом. В остальном она повторяла третью серию опытов. Расход пульпы в опытах определялся как сумма расходов, измеренных мерным водосливом в конце лотка и мерным водосливом отвода.

Четвертая глава посвящена анализу результатов исследований. По результатам первой серии опытов были проведены гранулометрический и химический анализы проб, отобранных в начале и в конце лотка, и сделано сравнение гранулометрического состава твердых частиц, содержащихся в пульпе, и распределения полезных компонентов в классах крупности. Из результатов следует, что гранулометрический состав твердых частиц в начале и в конце лотка практически одинаков. Это означает, что течение идет без осаждения твердых частиц в лотке, что подтверждают и визуальные обследования лотка после завершения опытов.

В второй серии опытов была поставлена цель выбрать оптимальное расстояние от начала лотка до отверстия в его дне, через которое отводится часть пульпы, поступающей в лоток. Опыты проводились при одинаковой ширине всех отверстий равных  $B_{щ}=15\text{см}$ .

Из обработки результатов исследований получилось, что отношение суммарного содержания меди в частицах, размер которых больше  $0,1\text{мм}$ , к аналогичному в начале лотка  $P_{Cu\text{ от}}/P_{Cu\text{ н}}$  увеличивается в зависимости от отношения расстояния от начала лотка до отвода к глубине потока  $L_{от}/h$ . Также подтверждено, что наибольший эффект отвода крупных частиц из пульпы через донные отверстие в лотке достигается при отношении скорости течения к

критической равной или близкой единице. По данным опытов приведены кривые грансостава и кривые суммарного распределения меди в частицах, меньших заданного размера. Сравнивая данные опытов, можно убедиться в неэффективности отвода крупных частиц через донное отверстие лотка при скоростях течения пульпы в лотке меньше критической ( $v \approx 0,8v_k$ ). Также приведены данные о величине относительного расхода пульпы, уходящей в отвод. Оказалось, что при относительной ширине щели  $B_{щ}/h$ , близкой к единице, в отвод уходит более одной трети расхода пульпы, поступающей в лоток. В отведенной пульпе содержится около 46 % частиц, размер которых больше 0,1мм; в них отношение  $P_{Cu\text{от}}/P_{Cu\text{ин}}$  достигает величины 1,5 и больше; оптимальная величина отношения  $L_{от}/h$  лежит в пределах 125 – 129.

Третья серия опытов заключалась в том, чтобы определить оптимальную ширину щели в отводе, расположенном на оптимальном расстоянии от начала лотка. Ширина щели на дне лотка изменялась с помощью пластин разной ширины. В результате обработки опытных данных

получены зависимости отношения  $P_{Cu\text{от}}/P_{Cu\text{ин}}$  от относительной ширины щели  $B_{щ}/h$ . Из результатов следует, что максимальный эффект по содержанию меди в отводе достигается при отношении  $B_{щ}/h = 1$ . При больших значениях этого отношения содержание меди в крупных фракциях изменяется мало. При этом через отверстие в дне лотка уходит около 40% расхода, поступающего в лоток.

Четвертая серия опытов была продиктована необходимостью проведения исследований при больших глубинах потока пульпы, чем те, которые были в предыдущих сериях. Изменить глубину наполнения можно было, увеличивая подачу пульпы в лоток, но подающее устройство имело ограничение в подаче. В связи с этим решено было провести дополнительную серию опытов с максимально возможной подачей пульпы в лоток при небольшом подпоре уровней в нем. Подпор создавался с помощью регулирующего устройства, которое находилось в конце лотка-пульпопровода. Опыты проводились при оптимальной величине отношения  $L_{от}/h$ , которое изменялось от 125 до 129, при трех ширинах щели 8, 10 и 15см. В результате исследования было обнаружено, что скорость течения пульпы в лотке была меньше критической, но приблизительно соответствовала нижнему пределу скорости, при котором процесс отвода эффективен  $v=(0,9-1,1)v_k$ . Следует обратить внимание на негативное явление, связанное с отбором части пульпы через донное отверстие в лотке с подпором уровней, а именно: в этих опытах наблюдалось отложение пульпы ниже отвода. Следовательно, режима отбора с подпором нужно избегать.

На рис.2 приводится в качестве примера зависимость отношения содержания меди в частицах с  $d > 0.1\text{мм}$  в отводе к суммарному содержанию меди в начале лотка, а на рис.3 –

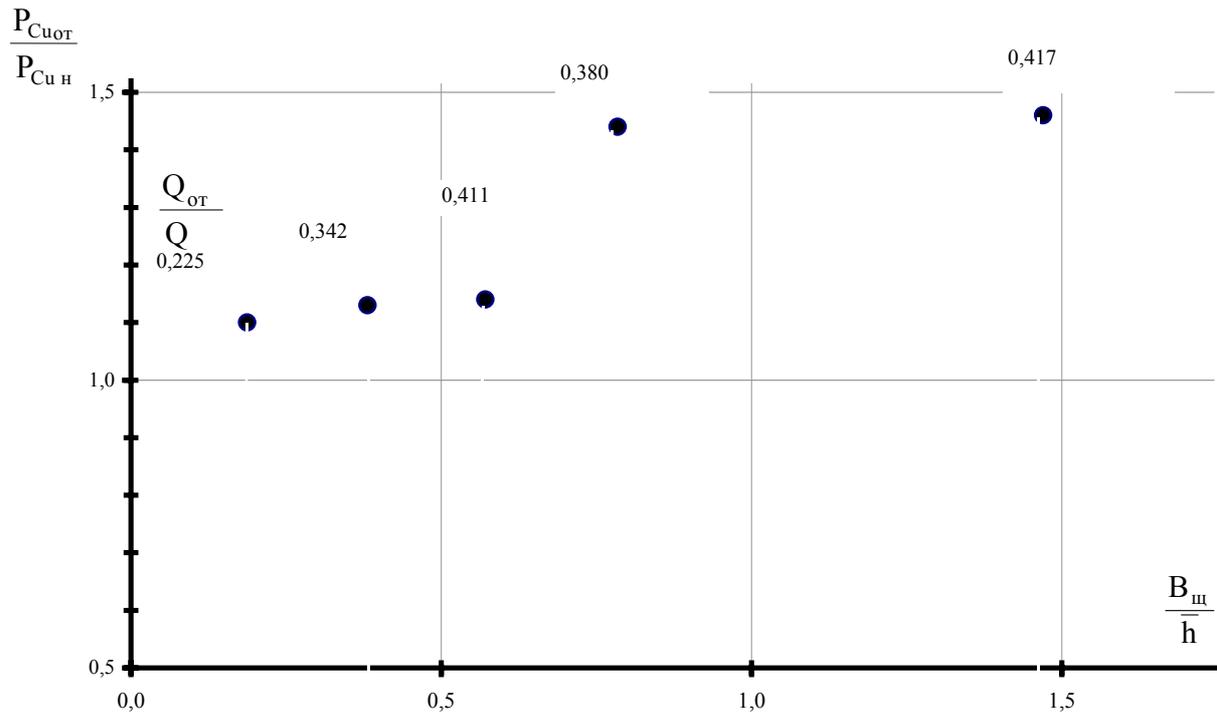


Рис. 2 Отношение суммарного содержания в % Cu в частицах с  $d > 0,1$  мм в отводе к суммарному содержанию Cu в начале лотка в зависимости от  $\frac{Q_{от}}{Q}$ ,  $\frac{B_{ш}}{h}$ , при  $L_{от}/h=$

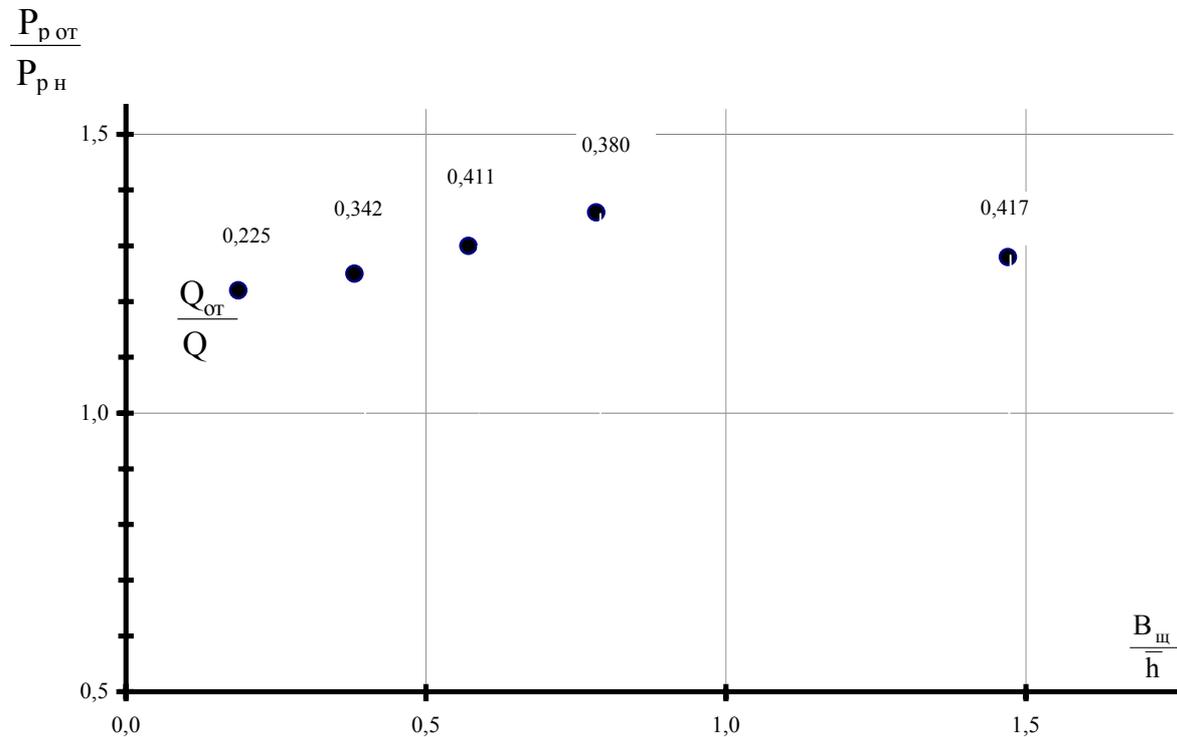


Рис. 3 Отношение суммарного содержания, в %, частиц с  $d > 0,1$  мм в отводе к суммарному содержанию в начале лотка в зависимости от  $\frac{Q_{от}}{Q}$ ,  $\frac{B_{ш}}{h}$ , при  $L_{от}/h=169-177$ .

отношение суммарного содержания частиц с  $d > 0.1$  мм в отводе к суммарному содержанию в начале лотка в зависимости от отношений  $B_{\text{от}}/h$ ,  $Q_{\text{от}}/Q$  при  $L_{\text{от}}/h = \text{const}$ .

В диссертации приводятся данные об отношении мутности пульпы в отводе к мутности в начале лотка, из которых следует, что мутность пульпы в отводе превышает мутность в начале лотка на 15-20%. Выполненные исследования свидетельствуют о том, что с помощью предложенного способа разделения пульпы можно увеличить содержание меди в отводе примерно в полтора раза по сравнению с ее содержанием в исходной пульпе при заметном увеличении мутности и крупности частиц в отводе, Скорость течения пульпы в лотке следует принимать равной критической. Наиболее приемлемой схемой для извлечения ценных металлов из ушедшей через отвод пульпы представляется следующая: гидравлическая классификация ее в гидроциклонах с целью увеличения песковой фракции, измельчение ее с последующей флотацией сульфидов из измельченного продукта.

В пятой главе содержится укрупнённая технико-экономическая оценка достижимых результатов от реализации рекомендаций, изложенных в диссертационной работе. В качестве исходных данных рассмотрим следующие.

Производительность обогатительной фабрики СП “Эрдэнэт” по переработке руды, ожидаемая в 2003 г. – 25 млн /т. Содержание меди в руде – 0,61 %. Ожидаемое извлечение меди в товарный концентрат в 2003 г – 84,1%. Содержание меди в % в хвостах:  $0,61(1,0 - 0,841) = 0,097\%$ . Содержание в исходной пульпе фракций с  $d > 0.1$  мм (данные основной серии опытов): – 44%. Часть массы хвостов, подвергаемая разделению в лотке: 0,6. Часть, уходящая в отвод: 0,4. Содержание в ней меди (приблизительно в 1,5 раза больше, чем в исходной пульпе) в %:

$0,097 \cdot 1,5 = 0,145\%$ . Остаток песковой фракции после гидроциклонирования 0,7. Содержание меди в песковой фракции после гидроциклонирования (приблизительно 1,5 раза больше, чем содержание меди в этой фракции до гидроциклонирования; по данным производства) в %:  $0,145 \cdot 1,5 = 0,217\%$ . Извлечение меди после флотации 60%. Содержание меди в концентрате после процесса доизвлечения принимаем пропорциональным отношению содержания меди в концентрате основной флотации к содержанию извлекаемой меди из руды:

$0,217 \cdot 25\% / (0,61 - 0,097) = 10,6\%$ . Ориентировочная стоимость 1 тонны медного концентрата с содержанием меди 25 % – 240 \$. Удельные затраты в измельчительно-флотационном отделении обогатительной фабрики “Эрдэнэт” на переработку одной тонны руды по факту 9 месяцев 2003 года составили 2,33 \$. Удельные затраты на гравитационно-флотационное доизвлечение меди из отвальных хвостов принимаем равными 5 %:  $2,33 \cdot 0,05 = 0,12$  \$. Удельные капитальные вложения на прирост мощности по измельчению и флотации без строительства отдельных зданий и сооружений принимаем 1,086 \$/т.

Ориентировочное количество меди в концентрате, извлекаемое за счет крупной фракции хвостов:  $25 \cdot 10^6 \text{ т} \cdot 0,95 \cdot 0,6 \cdot 0,4 \cdot 0,44 \cdot 0,217 \cdot 10^{-2} \cdot 0,7 \cdot 0,6 = 2285,8 \text{ т}$ , где 0,95 – доля отвалных хвостов от переработки руды в коллективном цикле флотации. Стоимость медного концентрата в цикле доизвлечения  $(2285,8/0,25) \cdot 240 \$ \cdot 10,6/25 = 930412 \$$ , где 10,6/25 – коэффициент понижения стоимости концентрата за счет снижения его качества с 25 до 10,6% по содержанию меди.

Эксплуатационные затраты от переработки песковой фракции за год будут равны:  $25 \cdot 10^6 \cdot 0,95 \cdot 0,6 \cdot 0,4 \cdot 0,44 \cdot 0,12 \$ = 300960 \$$  (масса перерабатываемой песковой фракции – 2508000т) Экономический эффект составит в год  $930412 - 300960 = 629452 \$$ . Капитальные вложения будут равны  $2508000 \cdot 1,086 \$ = 2723688. \$$  Окупаемость затрат:  $2723688/629452 = 4,3$  года.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Снижение содержания металлов в рудах, рост затрат на их добычу, развитие техники и технологии способствовали в последние годы все большему вовлечению в переработку старых хвостовых отвалов и хвостов текущей переработки обогатительных фабрик. Наиболее распространенные методы разделения, существующие сегодня на практике, – это гравитационное отстаивание и сепарация. Однако, чем мельче частицы, тем меньше возможности их разделения такими методами.

В последние годы стал применяться способ разделения, позволяющий выводить обогащенную часть хвостов из пульпопроводов в процессе транспортировки пульпы непосредственно на обогатительной фабрике. Этот способ основан на известном факте: из-за неоднородности твердой фазы по крупности и плотности нижние слои потока в пульпопроводе насыщаются более крупными и тяжелыми частицами. Метод прошел апробацию при транспортировке хвостов в напорных трубопроводах и оказался достаточно эффективным. Настоящая работа посвящается использованию этого метода разделения пульпы по фракциям в безнапорном лотке. По сравнению с напорным пульпопроводом, в котором движение пульпы равномерное, в безнапорном лотке имеются трудности с реализацией на практике такого режима движения на соответствующей установке, а также в методике обоснования ее параметров и проведении исследований.

Исследования проводились на опытной установке, которая подключалась к безнапорному лотку обогатительной фабрики на совместном Монголо-Российском предприятии «Эрдэнэт». Опытный образец представлял собой безнапорный лоток с отверстием в дне, через которое осуществлялся отвод пульпы из нижних слоев потока

при различных режимах подачи пульпы в лоток и отбора ее в отвод. При этом определялись гранулометрический состав частиц, содержание в них полезных компонентов и расходы пульпы в лотке и в отводе. Исследования проводились при скоростях движения пульпы в лотке больших неразмывающей но близких к незаиляющей для средних размеров частиц, содержащихся в пульпе.

Было выполнено обоснование гидравлического метода определения параметров безнапорного лотка-пульпопровода с отверстием в дне для отвода из нижних слоев потока частиц крупных фракций, а также разработана методика проведения исследований. Были проведены исследования с измерением гидравлических характеристик потоков и отбором проб для гранулометрического и химического анализов, обработаны результаты измерений и анализов и представлены в безразмерном виде. На основе анализа результатов исследований были сделаны обоснованные выводы, доказывающие возможность использования на практике предлагаемого способа разделения хвостовой пульпы. Предварительная экономическая оценка также свидетельствует о целесообразности применения рассматриваемого способа доизвлечения ценных компонентов из хвостовой пульпы. По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. Доказано, что процесс разделения пульпы с помощью донного отверстия в безнапорном лотке-пульпопроводе с заметным увеличением мутности и крупных фракций в пульпе, уходящей через отверстие, эффективен при равномерном режиме движения потока в лотке со скоростью течения, отличающейся от незаиляющей (критической) не более, чем на  $\pm 10\%$ . Режим течения с подпором уровней потока пульпы в лотке недопустим.
2. Найдено оптимальное расстояние от начала лотка, в котором проводились исследования, до места нахождения отверстия в его дне: оно должно быть равно не менее 120-130 глубин потока в лотке.
3. Ширина отверстия в продольном направлении (вдоль оси лотка) должна быть равна глубине лотка. В поперечном направлении размер отверстия совпадает с шириной лотка прямоугольного поперечного сечения.
4. Исследования позволили установить, что предлагаемое устройство позволяет отвести через донное отверстие приблизительно 40% от расхода пульпы, поступающей в лоток.
5. Впервые доказано, что с помощью предложенного устройства на совместном Монголо-Российском предприятии «Эрдэнэт» можно увеличить в пульпе, уходящей через донное отверстие, содержание меди в крупных фракциях приблизительно в полтора раза по сравнению с ее содержанием в тех же фракциях в исходной пульпе.

6. Впервые разработана и успешно апробирована на совместном Монголо-Российском предприятии «Эрдэнэт» методика гидравлического расчета лотка-пульпопровода с донным отверстием для разделения пульпы на два потока, позволяющая увеличить в пульпе, уходящей через отверстие, содержание крупных фракций.
7. Впервые разработана и прошла успешное испытание методика проведения исследований на разработанном устройстве деления пульпы гидравлическим способом, предусматривающая измерения расходов пульпы в лотке и в отводе, отбор проб, их гранулометрический и химический анализы, представление результатов в безразмерном виде.
8. Предложена методика технико-экономических расчетов, учитывающая необходимость дополнительного процесса сепарации отведенной пульпы, измельчения крупных фракций и последующей флотации с разработкой соответствующей технологической линии, доказывающая целесообразность внедрения в производство предлагаемого способа разделения хвостовой пульпы на фракции.

#### ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ

1. Михалев М. А., Дамбажав Оюун. Разделение пульпы по фракциям в безнапорном пульпопроводе. // XXI неделя науки СПбГПУ: материалы межвузовской научной конференции. С.-Пб.: Изд-во СПбГПУ 2003г. С.31-32.
2. Михалев М.А., Дамбажав Оюун. Способ разделения пульпы по фракциям с помощью донных отверстий в безнапорном пульпопроводе// VI международная специализированная конференция и выставка “ Акватерра”: Сборник материалов конференции. С.- Пб. 2003. С.200-201.