

Научная статья
 УДК 621.9.048.6+622.7
 DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-3-45-55

Разработка системы контроля параметров рудной пульпы в процессе ультразвуковой обработки

Валентин Алексеевич Иодис

*Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения
 Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский, Россия
 iodisva@mail.ru*

Информация о статье

Статья поступила
 в редакцию 24.04.2023

Одобрена после
 рецензирования 15.07.2023

Принята к публикации
 18.07.2023

Ключевые слова:

*ультразвуковое излучение,
 рудная пульпа, вода,
 физические свойства,
 физико-химические
 свойства, монтаж,
 лабораторный реактор,
 система контроля
 параметров, система
 регулирования параметров,
 бактериально-химическое
 окисление*

Работа посвящена разработке системы контроля параметров рудной пульпы в процессе ультразвуковой обработки. Цель исследования – проследить изменения физических, физико-химических свойств рудных пульп, их жидких фаз в процессе ультразвуковой обработки и разработка системы контроля их параметров для лабораторного реактора ультразвукового воздействия. Обзор литературных источников показал что, под действием ультразвукового излучения в жидких средах рудных пульп происходит целый комплекс физических, физико-химических и химических процессов, которые изменяют их свойства. Анализ изменения физических, физико-химических свойств рудных пульп, их жидких фаз в процессе ультразвуковой обработки показал возрастание температуры, что снижает интенсивность кавитации в 20–30 раз, увеличение значения водородного показателя на 4–5 % для воды, на 7,9 % угольной пульпы и на 3,37–4,5 % для суспензий (частота 20 кГц), рост значения окислительно-восстановительного потенциала в первые 6–8 мин на 24 %, увеличение значения электропроводности в течение первых 5–6 мин на 8–8,5 % и электродного потенциала на 13,6–16,6 %. Однако значения динамической вязкости снижались, особенно интенсивно (в 4 раза) за первые 300 с обработки. При увеличении частоты излучения до 1 МГц значения водородного показателя падали. На основании данных исследований разработана схема системы контроля параметров пульпы. Для контроля параметров использованы приборы – рН-метр марки рН-150 МИ с погрешностью измерения при определении водородного показателя $\pm 0,05$, при определении значений окислительно-восстановительного потенциала ± 3 мВ, кондуктометр РС 100 с погрешность ± 2 полной шкалы. Также использован вибровискозиметр SV-10 с точностью измерения ± 3 % (от 1 до 1000 мПа·с) и измеритель-регулятор температур ИРТ-4/16 с разрешающей способностью индикации 0,1 °С, с приведённой погрешностью измерений $\pm 0,25$ %. Исследование ультразвуковой обработки рудных пульп представляет большой интерес и требует проведения дальнейших экспериментальных исследований.

Original article

Development of a System for Monitoring the Parameters of ore Pulp in the Process of Ultrasonic Treatment

Valentin A. Iodis

*Research Geotechnological Center Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
 Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
 iodisva@mail.ru*

Information about the article

Received 24 April, 2023

Approved after review
 15 July, 2023

Accepted for publication
 18 July, 2023

The work is devoted to the development of a system for monitoring the parameters of the ore pulp in the process of ultrasonic treatment. The aim of the work is to analyze the changes in the physical, physico-chemical properties of ore pulps, their liquid phases in the process of ultrasonic treatment and to develop a system for monitoring their parameters for a laboratory ultrasonic reactor. A review of literary sources has shown that under the action of ultrasonic radiation in liquid media of ore pulps, a whole complex of physical, physico-chemical and chemical processes occurs that change their properties. An analysis of changes in the physical, physico-chemical properties of ore pulps, their liquid phases, during ultrasonic treatment has shown an increase in

Keywords:

ultrasonic radiation, ore pulp, water, physical properties, physical and chemical properties, installation, laboratory reactor, parameter control system, parameter control system, bacterial-chemical oxidation

temperature, which reduces the intensity of cavitation by 20–30 times, an increase in the pH value by 4–5 % for water, by 7.9 % coal pulp and by 3.37–4.5 % for suspensions (frequency 20 kHz), an increase in the value of the redox potential in the first 6–8 minutes by 24 %, an increase in the value of electrical conductivity during the first 5–6 minutes by 8–8.5 % and electrode potential by 13.6–16.6 %. However, the values of dynamic viscosity decreased, especially intensively (by a factor of 4) during the first 300 s of the treatment. With an increase in the radiation frequency to 1 MHz, the values of the hydrogen index fell. On the basis of these studies, a scheme of the pulp parameters control system has been developed. To control the parameters, devices were used – a pH meter brand pH-150 MI, with a measurement error in determining the pH value of ± 0.05 , in determining the values of the redox potential ± 3 mV, a conductometer RS 100 with an error of ± 2 full scale. An SV-10 vibroviscometer with a measurement accuracy of ± 3 % (from 1 to 1000 mPa s) and an IRT-4/16 temperature meter with an indication resolution of 0.1°C, with a reduced measurement error of ± 0.25 % were also used. The study of ultrasonic treatment of ore pulps is of great interest and requires further experimental studies.

Введение. Извлечение ценных компонентов из минералов с помощью микроорганизмов является общепризнанным биогидрометаллургическим процессом переработки руд. Он имеет низкие производственные затраты, экологичен, но имеет недостатки [13]. Снизить их возможно путём активации процесса бактериально-химического окисления. Интенсифицировать процесс возможно воздействием ультразвукового излучения на рудную пульпу (частота 22 кГц и более) для удаления оксидных плёнок с поверхности сульфидных минералов¹ [1; 5; 7; 8; 12; 14–16; 20; 23]. Положительная эффективность ультразвукового воздействия связана с обновлением поверхности минерала, освобождением её от не связанных структурно с кристаллической решёткой наслоений. Механическая оттирка и химическая обработка не обеспечивают достаточной степени очистки, удаления оксидных плёнок [3].

Под действием УЗИ в жидких средах рудных пульп происходит целый комплекс физических, физико-химических и химических процессов, к ним можно отнести кавитацию, радиационное давление, акустические потоки. Под влиянием ультразвуковых колебаний в пульпе возникают зоны сжатия и растяжения. При прохождении волны, создающей разряжение, в жидкости образуется большое количество разрывов в виде мельчайших полостей – кавитационных пузырьков. Образовавшиеся пузырьки в следующем полупериоде сжатия резко схлопываются. Кавитационная полость одиночного пузырька расширяется относительно медленно, однако процесс её сжатия в особенности конечная стадия совершается в очень короткое время. Процесс кавитации можно охарактеризо-

вать как трансформацию мощности, так как энергия, накопленная всей кавитационной полостью за период колебаний, выделяется за его минимальную долю [3; 17; 19; 21]. Кавитационные эффекты, возникающие в ультразвуковом поле, интенсифицируют процессы очистки поверхности рудных частиц от различного рода загрязнений и оксидных плёнок минерального характера, повышают скорость диффузии жидкой части пульпы в поры и трещины, образующиеся на поверхности минеральных плёнок в результате их кавитационного разрушения, ускоряют процессы диспергирования и дезинтеграции минералов и т. д. Радиационное давление возникает при высокой интенсивности УЗИ, как и акустические потоки. При гидроабразивном разрушении поверхности минеральных частиц, находящихся в пульпе радиационное давление играет существенную роль [9]. Акустические потоки вызывают интенсивное перемешивание пульпы и играют большую роль при ультразвуковой очистке поверхности рудных частиц от различного рода загрязнений минерального характера [4]. Поэтому при использовании ультразвуковой обработки в технологических процессах большое внимание следует уделять выбору параметров УЗИ – интенсивности воздействия, его продолжительности и частоте колебаний.

Актуальность. В процессе ультразвукового воздействия будут меняться физические, физико-химические свойства рудной пульпы, в частности, жидкой фазы – воды. Контроль и регулирование изменения свойств пульпы в процессе ультразвуковой обработки важная задача, так как они в дальнейшем влияют на общие свойства смеси бактериальной суспензии и пульпы при проведении процесса бактериально-химического окисления. Как показал анализ литературных источников, данных об изменениях физических,

¹ Основы физики и техники ультразвука: учеб. пособие для вузов / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский [и др.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

физико-химических свойств рудных пульп, их жидких фаз при ультразвуковом воздействии небольшое количество.

Объект исследования – рудная пульпа, её жидкая фаза. **Предмет исследования** – физические, физико-химические свойства рудных пульп, их жидких фаз.

Цель исследования – проанализировать изменения физических, физико-химических свойств рудных пульп, их жидких фаз в процессе ультразвуковой обработки и разработать систему контроля их параметров.

Задачи исследования:

1. Проанализировать изменения физических, физико-химических свойств рудных пульп, их жидких фаз, в процессе ультразвуковой обработки.

2. Разработать схемы системы контроля параметров пульпы для лабораторного реактора ультразвукового воздействия.

Методология базируется на системном подходе к объекту исследования как к среде изменяющей свои свойства при ультразвуковом воздействии. **Методы исследования:** при решении поставленных задач применялись методы обобщения, систематизации и сравнительного анализа.

Разработанность темы. Изучением изменений физических, физико-химических свойств рудных пульп, их жидких фаз, разработкой лабораторных, полупромышленных и промышленных установок ультразвуковой обработки рудных пульп занимались многие учёные – М. М. Чубыкин, Г. А. Хан, В. А. Глембоцкий, Б. А. Агранат и др.

К физическим свойствам пульпы, их жидких фаз относят их температуру (изменение температуры), вязкость (η), электропроводность (ω).

1. Температура. При ультразвуковом воздействии пульпа нагревается, вследствие перехода кинетической энергии захлопывающихся кавитационных пузырьков в тепловую. Для определения роста температуры пульпы по времени можно воспользоваться калориметрическим методом. Метод позволяет установить зависимость между интенсивностью ультразвукового излучения, I и термодинамическими, физическими, кинематическими свойствами пульпы¹ [1].

Зависимость определяется

$$t_2 = t_1 + (I \cdot S \cdot \Delta t) / (4,18 \cdot c \cdot m),$$

где c – теплоёмкость пульпы, Дж/кг · °С;

¹ Основы физики и техники ультразвука: учеб. пособие для вузов / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский [и др.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

m – масса пульпы, кг;

S – площадь эффективной излучающей поверхности, м²;

t_1 – температура пульпы до УЗИ обработки, °С;

Δt – продолжительность УЗИ обработки, с.

Как показывает опыт, за несколько минут температура пульпы в зависимости от интенсивности излучения может достигать 50–60 °С и более. Однако эксперименты, приведённые в работе [22], показали, что интенсивность кавитации в ультразвуковой диапазоне частот ($22 \pm 1,65$ кГц) падает в десятки раз при увеличении температуры воды от 20 до 80 °С (рис. 1а). Вследствие чего при ультразвуковой обработке пульп необходимо предусматривать внешнее охлаждение.

Исследования 2009 г., выполненные в Хэйлунцзянском университете науки и технологий (Китай), показали, что интенсивный рост температуры происходит в первые 240 с воздействия, а в остальное время значение температуры стабилизируется (рис. 1б). Эксперименты проводили при частоте колебаний 20 кГц, мощности 200 Вт с угольной пульпой – смесью 5 г измельченного угля и 70 мл воды. Как отмечают авторы рост температуры приводил к увеличению активности свободных радикалов ОН⁻ [18].

2. Вязкость. Исследования изменение вязкости дистиллированной воды при возбуждении в ней ультразвуковых колебаний проводились в Санкт-Петербургском горном университете [1].

Эксперименты велись с использованием ультразвуковой установки марки ИНЛАБ И100-6/1-1 (мощность 400 Вт, частота колебаний 20 кГц) с последующей фиксацией коэффициента динамической вязкости, η на вибровискозиметре марки SV-10. Продолжительность ультразвуковой обработки составляла 3000 с. Исследование показало, что максимальное изменение/снижение вязкости воды, вследствие уменьшения сил молекулярного сцепления, происходило в первые 300 с УЗИ воздействия, в следующие 600 с снижение происходило медленнее, а в остальное время значение η практически не менялось (рис. 2).

3. Электропроводность. Контроль изменения значений электропроводности, ω при УЗИ обработке не жесткой воды при ультразвуковой интенсивности 3–4 Вт/см², частоте 20 кГц, продолжительности 300 с показал их незаметное изменение [3]. Как и незначитель-

ное уменьшение общей и удельной электропроводности суспензий $ZrSiO_4$ и $FeTiO_3$ при продолжительности обработки более 1800 с. Зависимость $\omega = f(t)$ представлена на рис. 3а.

К физическо-химическим свойствам пульп, их жидких фаз относят: водородный показатель (рН), окислительно-восстановительный потенциал (Еh), электродный потенциал (Е').

1. Водородный показатель. Контроль значений рН суспензии $ZrSiO_4$, $FeTiO_3$, TiO_2 после ультразвукового воздействия при 3–4 Вт/см², 20 кГц и продолжительности

1800 с показал изменения значений 7,26–7,61, 7,56–7,85, 7,85–8,15. Для нежёсткой воды через 300 с УЗИ рН менял абсолютную величину (увеличивался) на 0,17, а через 1800 с на 0,67 [3].

При исследовании ультразвуковой обработки дистиллированной воды продолжительностью 15, 30, 60, 120 с водородный показатель возрастал от исходного значения на 0,25, 0,52, 0,65 и на 0,67. Авторы [13; 18] отмечали явление диссоциации молекул воды, также при росте значения рН во времени¹. Зависимость $pH = f(t)$ представлена на рис. 3.

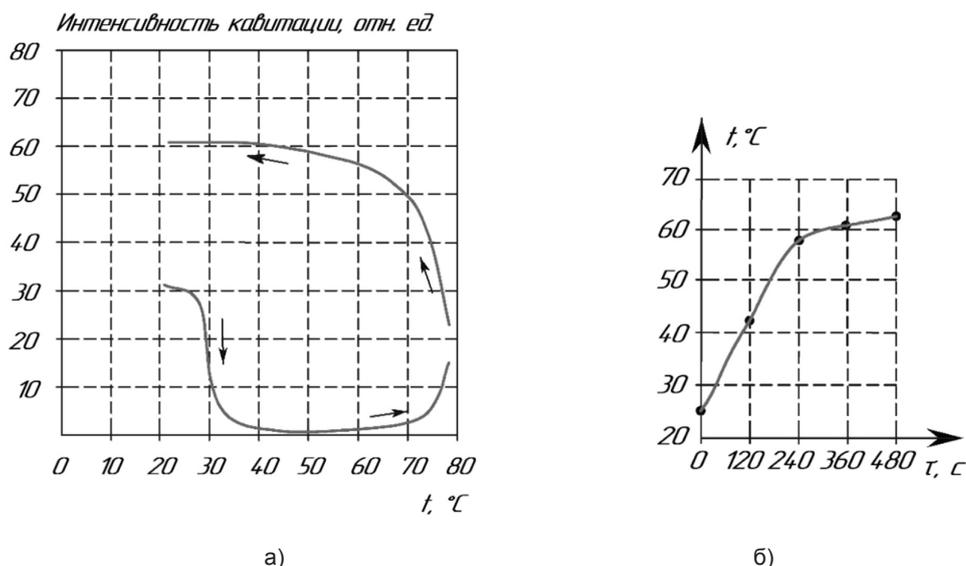


Рис. 1. Зависимости интенсивности кавитации от температуры и температуры пульпы от продолжительности УЗИ обработки [18; 22]: а) интенсивности кавитации от температуры; б) температура пульпы от продолжительности УЗИ обработки / **Fig. 1.** Dependencies of cavitation intensity on temperature and pulp temperature on the duration of ultrasound treatment [18; 22]: а) the intensity of cavitation on temperature; б) temperature pulp on the duration of ultrasound treatment

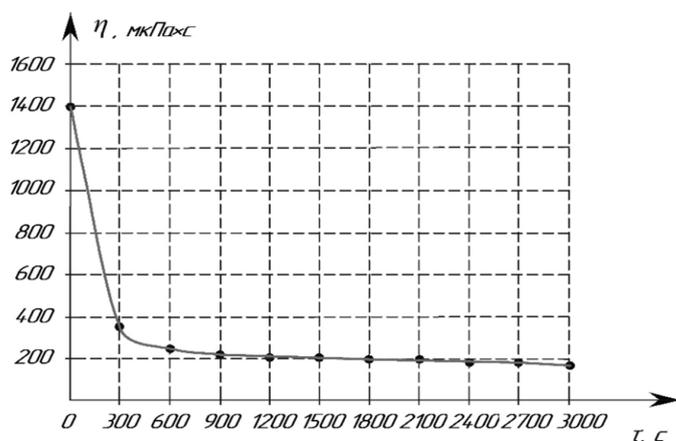


Рис. 2. Зависимость вязкости воды от продолжительности УЗИ обработки [1] / **Fig. 2.** Dependence of water viscosity on the duration of ultrasonic treatment [1]

¹ Основы физики и техники ультразвука: учеб. пособие для вузов / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский [и др.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

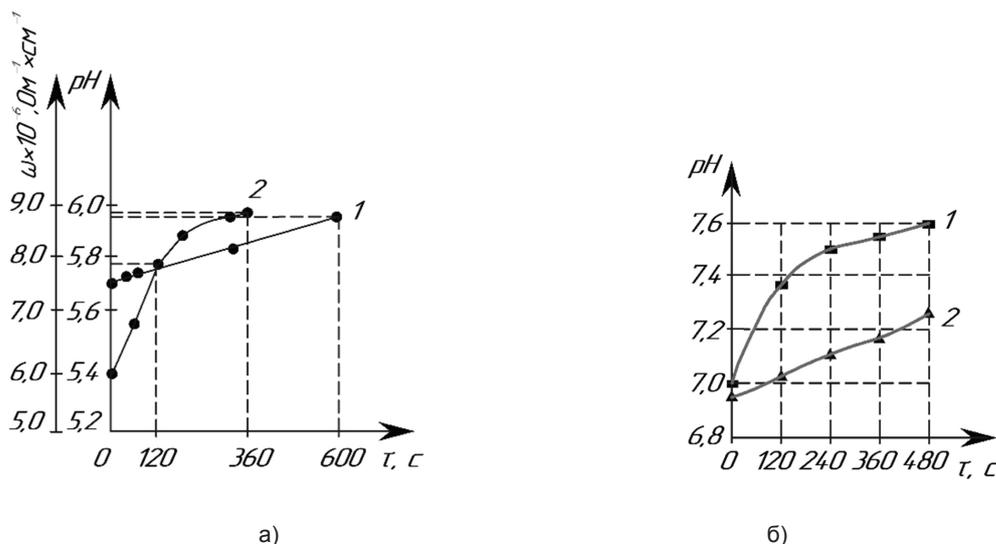


Рис. 3. Зависимости pH воды, угольной пульпы, электропроводности воды от продолжительности ультразвуковой обработки [13; 18]: а) 1 – pH воды, 2 – электропроводность воды; б) 1 – pH угольной пульпы, 2 – pH воды / **Fig. 3.** The dependences of the pH of water, coal pulp, electrical conductivity of water on the duration of ultrasonic treatment [13; 18]: a) 1 – pH of water, 2 – electrical conductivity of water; b) 1 – coal pulp pH, 2 – water pH

Исследование УЗИ воздействия на изменение pH артезианской, водопроводной воды показало схожие результаты [2]. При озвучивании с частотой 22 кГц в течение 60 с наблюдалось изменение водородного показателя с 7,8–8,6 (артезианская вода) и с 5,9–6,3 (водопроводная вода). Авторы объясняют этот эффект образованием гидроксильных радикалов OH^- . После 60 с обработки значения pH оставались постоянными. При увеличении частоты ультразвуковых колебаний до 1 МГц водородный показатель падал.

2. Окислительно-восстановительный потенциал. Известно, что под действием ультразвуковой кавитации в водных растворах/жидких фазах пульп могут протекать реакции окисления и восстановления. Данные реакции возникают вследствие образования гидроксильных радикалов OH^- и H^+ -ионов, образующихся при расщеплении молекул воды. При рекомбинации радикалов возможно также образование перекиси водорода и других соединений [6].

Экспериментальные исследования, приведённые в работе [13], показали, что значение Eh воды возрастает при увеличении продолжительности воздействия, с постоянной интенсивностью излучения (10 Вт/см^2), частотой ($19,5 \text{ кГц}$)¹. Зависимость $Eh = f(\tau)$ представлена на рис. 4а.

¹ Основы физики и техники ультразвука: учеб. пособие для вузов / Б. А. Агранат, М. Н. Дубровин, Н. Н. Хавский [и др.]. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.

3. Электродный потенциал. Влияние продолжительности ультразвуковой обработки на изменение значений электродных потенциалов $\Delta E'$ пирита и халькопирита определено в работе [13]. Как показал эксперимент, (рис. 4б), характер $\Delta E'$, обработанной УЗИ минеральной поверхности и воды похожи.

Результаты исследования и их обсуждение. Обзор литературных данных показал, что при ультразвуковой обработке происходят изменения физических, физико-химических свойств рудных пульп, их жидких фаз. Анализ изменений свойств показал возрастание их температуры, увеличение значения водородного показателя, рост значения окислительно-восстановительного потенциала, увеличение значения электропроводности, электродного потенциала, снижение значения динамической вязкости.

На основании анализа изменения свойств рудных пульп, их жидких фаз, в процессе ультразвуковой обработки разработана схема контроля и регулирования параметров, представленная на рис. 5.

Измельчённая руда и дистиллированная вода смешивается в баке в соотношении 1:1. Из него рудная пульпа подаётся перистальтическим насосом в камеру ультразвуковой обработки, где происходит удаление (снятие) оксидных плёнок с поверхности сульфидных минералов. Из камеры рудная пульпа направляется в обратном в бак. Температуры пульпы на входе/выходе из камеры фиксируются. В бак заведены датчики

контроля водородного показателя, окислительно-восстановительного потенциала и электропроводности. Через установленные промежутки времени (180, 360, 600 и 900 с) небольшая часть пульпы забирается для определения значения динамической вязкости. По окончании УЗИ активации пульпа смешивается с бактериальной суспензией

и смесь направляется в первый реактор каскада для проведения процесса бактериально-химического окисления. Бактериальная суспензия включает инокулят (концентрация клеток *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *Sulfobacillus* sp., *Ferroplasma* sp. $\approx 10^9$ кл/мл) и минеральную основу среды Сильвермана-Люнгрена [10; 11].

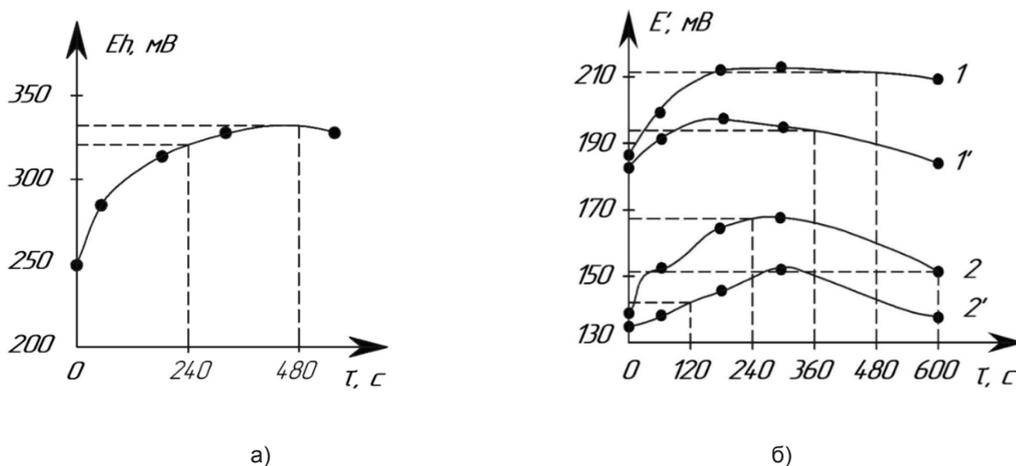


Рис. 4. Зависимости Eh воды и E' пирита и халькопирита от продолжительности ультразвуковой обработки [13]: а) Eh ; б) E' 1, 2 – обработка поверхности минерала; 1', 2' – обработка воды / **Fig. 4.** Dependencies of Eh of water and E' of pyrite and chalcopyrite on the duration of ultrasonic treatment [13]: а) Eh ; б) E' 1, 2 – surface treatment of the mineral; 1', 2' – water treatment

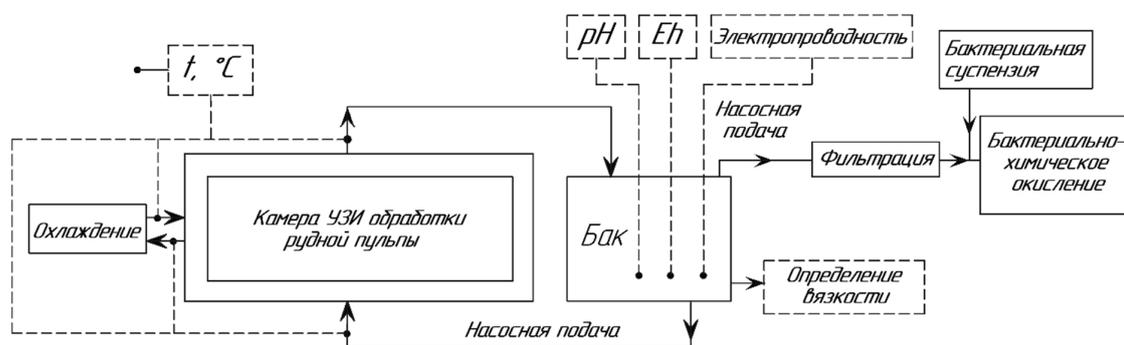


Рис. 5. Схема системы контроля/регулирующих параметров пульпы в процессе её УЗИ активации / **Fig. 5.** Scheme of the system for monitoring/regulating the parameters of the pulp in the process of its activation by ultrasound

Для исследования процесса УЗИ обработки рудной пульпы в НИГТЦ ДВО РАН рассчитан, спроектирован и смонтирован лабораторный реактор. Реактор состоит из камеры обработки пульпы с наружным водяным охлаждением, генератора ультразвуковых колебаний марки УЗТА-0,4/22-ОМ, перистальтического насоса марки Kropos 50 Full, "Seko" и контрольно-измерительных приборов. Камера охлаждения снаружи теплоизолировалась. Для циркуляции пульпы, охлаждающей воды камеры пульпы и ох-

лаждения соединялись с насосом, системой холодного водоснабжения (ХВС) силиконовыми шлангами. Схема смонтированного в НИГТЦ ДВО РАН лабораторного реактора с системой контроля/регулирующих параметров пульпы в процессе её УЗИ активации представлена на рис. 6. Контрольно-измерительные приборы устанавливались на химическом и лабораторном столах лаборатории. Общий вид реактора с системой контроля/регулирующих параметров представлен на рис. 7.

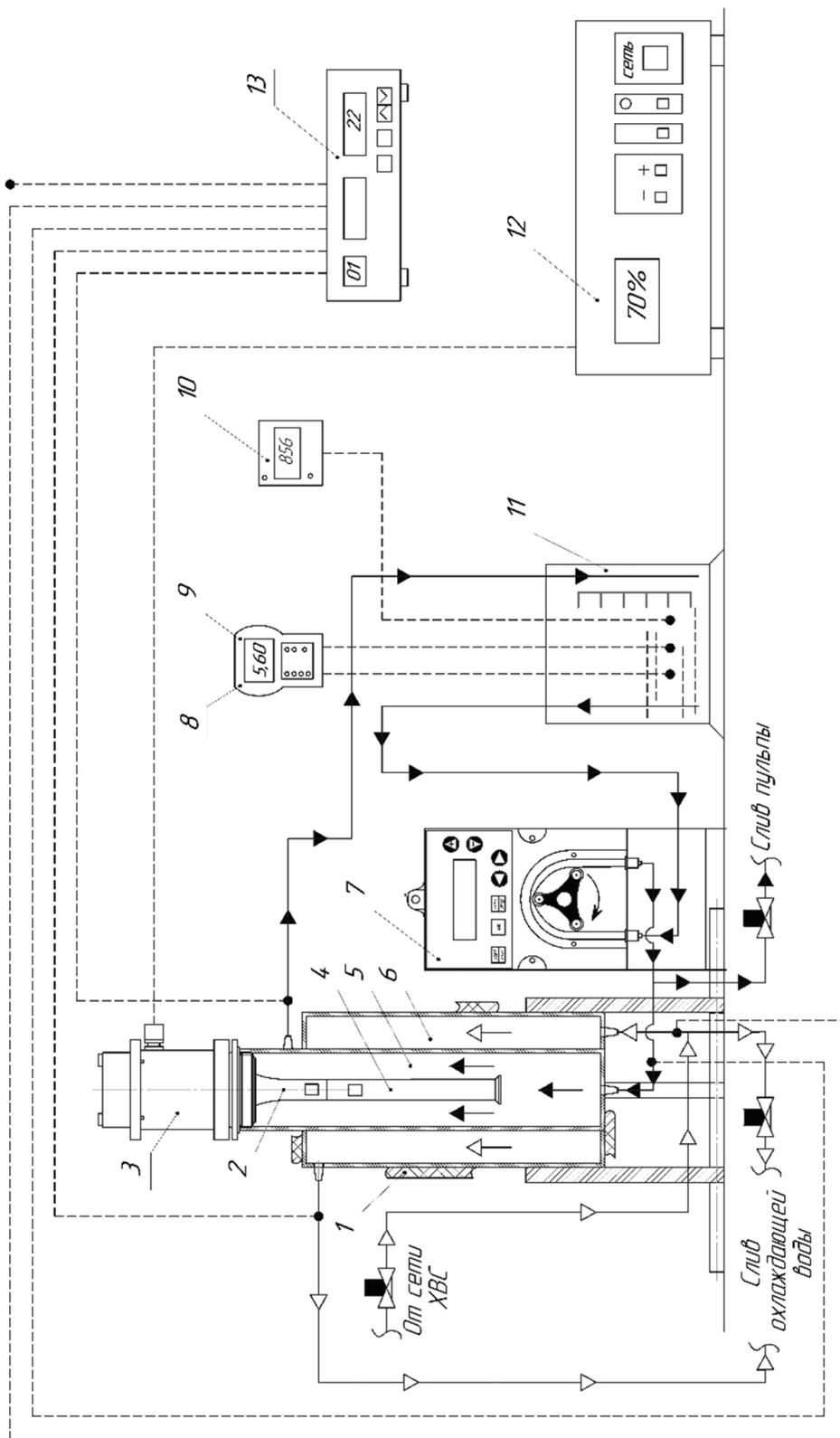


Рис. 6. Схема смонтированного в НИГТЦ ДВО РАН лабораторного реактора с системой контроля/регулирования параметров пульпы в процессе её УЗИ активации: 1 – теплоизоляция; 2 – концентратор; 3 – пьезоэлектрическая колебательная система; 4 – рабочий инструмент; 5 – камера УЗИ обработки пульпы; 6 – камера охлаждения; 7 – перистальтический насос; 8, 9 – pH, Eh метр; 10 – кондуктометр; 11 – реактор; 12 – генератор ультразвуковых колебаний; 13 – измеритель-регулятор температуры / **Fig. 6.** Scheme of a laboratory reactor mounted at the NIGTC FEB RAS with a system for monitoring / regulating the parameters of the pulp in the process of its ultrasonic activation: 1 – thermal insulation; 2 – concentrator; 3 – piezoelectric oscillatory system; 4 – working tool; 5 – ultrasound chamber for pulp processing; 6 – cooling chamber; 7 – peristaltic pump; 8, 9 – pH, Eh meter; 10 – conductometer; 11 – reactor; 12 – generator of ultrasonic oscillations; 13 – temperature meter-regulator



Рис. 7. Общий вид смонтированного в НИГТЦ ДВО РАН лабораторного реактора с системой контроля / регулирования параметров пульпы в процессе её УЗИ активации / **Fig. 7.** General view of the laboratory reactor mounted at the NIGTC FEB RAS with a system for monitoring/regulating the parameters of the pulp during its ultrasonic activation

Контрольно-измерительными приборами служили:

– рН-метр рН-150 МИ (комплект с электродом ЭСК-10603/7 К80.7, ТДЛ-10006, штатив ШУ-5). При измерении водородного показателя – диапазон измерений от 1,00 до 14,00, дискретность 0,01, погрешность преобразователя $\pm 0,02$, погрешность прибора $\pm 0,05$.

При измерении окислительно-восстановительного потенциала – диапазон измерений от минус 2000 до 2000 мВ, дискретность 1, погрешность преобразователя ± 3 ;

– кондуктометр РС 100. При измерении удельной электропроводности – диапазон измерений от 0 до 999 мкСм, цена деления 1 мкСм, погрешность ± 2 полной шкалы;

– вибровискозиметр SV-10. При измерении динамической вязкости – диапазон измерений от 0,3 до 10000 мПа \cdot с, точность измерения ± 3 % (от 1 до 1000 мПа \cdot с);

– измеритель-регулятор температур ИРТ-4/16 с разрешающей способностью индикации 0,1 $^{\circ}$ С, диапазоном измерений от

минус 200 $^{\circ}$ С до плюс 100 $^{\circ}$ С, пятью термопарами марки ТМК с приведённой погрешностью измерений $\pm 0,25$ %. Четыре термопары заведены сквозь шланги непосредственно в потоки пульпы и охлаждающей воды. Одна термопара измеряла температуру воздуха лаборатории.

Выводы. На основании исследований изменения физических, физико-химических свойств рудных пульп, их жидких фаз разработана система контроля параметров пульпы для лабораторного реактора ультразвукового воздействия. Для контроля параметров использованы приборы – рН-метр марки рН-150 МИ, кондуктометр марки РС 100, вибровискозиметр марки SV-10, измеритель-регулятор температур марки ИРТ-4/16.

Для точного определения изменений значений физических и физико-химических свойств рудных пульп, их жидких фаз необходимо проведение экспериментальных исследований процесса ультразвукового воздействия.

Список литературы

1. Блайда И. А., Васильева Т. В. Влияние ультразвука на процессы биовыщелачивания металлов и десульфуризации углей // Микробиология и биотехнология. 2017. № 4. С. 6–20. DOI: [http://dx.doi.org/10.18524/2307-4663.2017.4\(40\).119111](http://dx.doi.org/10.18524/2307-4663.2017.4(40).119111).
2. Викулин П. Д., Викулина В. Б. Влияние ультразвука на изменение рН воды // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 4. С. 3–8. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.3-8.
3. Байшулаков А. А., Глембоцкий В. А., Кириллов О. Д., Колчманова А. Е., Соколов М. А., Якубович И. А. Ультразвук в обогащении полезных ископаемых. Алма-Ата: Наука, 1972. 229 с.
4. Зарембо Л. К. Акустические течения. Физика и техника мощного ультразвука: в 2 т. / под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. Т. 2. 267 с.
5. Иодис В. А., Трухин Ю. П. Разработка укрупненного проточного каскадного бактериально-химического реактора с УЗИ активацией для бактериально-химической переработки кобальт-медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск № 19. 2021. № 11. С. 136–146. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_19_136.

6. Кортнев А. В., Протопопов Р. В. О действии ультразвука на образование перекиси водорода. М.: Изд. Акустического института, 1968. С. 7–39.
7. Корчевенков С. А., Афанасова А. В., Управителева А. А., Калмыкова Т. Д. Обзор воздействий для управления реологическими свойствами суспензий в процессах переработки минерального и углеводородного сырья // Научный аспект. 2018. Т. 7, № 4. С. 819–826.
8. Ревнивцев В. И., Дмитриев Ю. Г. Применение ультразвука для очистки вредных примесей искусственных абразивных материалов // Применение ультразвука в машиностроении. М.: ЦИНТИАМ, 1963. С. 36–42.
9. Розенберг Л. Д. Кавитационная область. В кн.: Физика и техника мощного ультразвука. Т. 2. Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. 267 с.
10. Трухин Ю. П., Балыков А. А., Вайнштейн М. Б. Бактериально-химическое выщелачивание кобальт-медно-никелевых руд и технологическая схема переработки продуктивных растворов никеля и кобальта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 12. С. 5–22. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-35-5-22.
11. Трухин Ю. П., Иодис В. А., Хайнасова Т. С. СВЧ и УЗИ активация кинетики бактериально-химических процессов выщелачивания кобальт-медноникелевых руд месторождения Шануч // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 11. С. 113–123. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_19_113.
12. Хайнасова Т. С. Факторы, влияющие на бактериально-химические процессы переработки сульфидных руд // Записки горного института. 2019. Т. 235. С. 47–54. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.47.
13. Хан Г. А., Пантелеева Н. Ф., Смирнов Ю. Р., Виноградова И. Н. Влияние воды, обработанной ультразвуковыми колебаниями, на флотацию сульфидных минералов. М.: Metallurgy, 1971. 286 с.
14. Черных С. И., Рыбакова О. И., Лебедев Н. М., Жирнова Т. И. К вопросу изучения влияния ультразвука, магнитных полей и электрического тока на флотацию золота // Цветная металлургия. 2003. № 6. С. 15–25.
15. Чубыкин М. М. Изучение ультразвукового диспергирования на минералах Кимберлитовой руды // Труды Иргиредмета. 1968. № 12. С. 16–22.
16. Chanturia V. A., Minenko V. G., Samusev A. L., Ryazantseva M. V., Chanturia E. L., Koporulina E. V. Influence exerted by ultrasound processing on efficiency of leaching, structural, chemical, and morphological properties of mineral components in eudialyte concentrate // Journal of Mining Science. 2018. Vol. 54, no. 2. С. 285–291. DOI: 10.1134/S1062739118023641.
17. Chi P., Chaoyue Z., Qinfeng L., Shilong Z., Yu S., Hairui L., Jianhong F. Erosion characteristics and failure mechanism of reservoir rocks under the synergistic effect of ultrasonic cavitation and micro-abrasives // Advanced Powder Technology. 2021. Vol. 32. P. 4391–4407. DOI: 10.1016/j.apt.2021.09.046.
18. Kang W., Xun H., Kong X., Li M. Effects from changes in pulp nature after ultrasonic conditioning on high-sulfur coal flotation // Mining Science and Technology. 2009. Vol. 19. P. 498–507. DOI: 10.1016/S1674-5264(09)60093-4.
19. Kozmus G., Zevnik J., Hocevar M., Dular M., Petkovsek M. Characterization of cavitation under ultrasonic horn tip – Proposition of an acoustic cavitation parameter // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. Vol. 89. 106159. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106159.
20. Lu J., Wang N., Yuan Z., Zhang Q., Li L., Wang Z. The effects of ultrasonic wave on heterogeneous coagulation and flotation separation of pentlandite-serpentine. Текст: электронный // Minerals Engineering. 2022. Vol. 188. URL: https://www.researchgate.net/publication/363363455_The_effects_of_ultrasonic_wave_on_heterogeneous_coagulation_and_flotation_separation_of_pentlandite-serpentine (дата обращения: 21.04.2023).
21. Mao Y., Xia W., Peng Y., Xie G. Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review // Fuel Processing Technology. 2019. Vol. 195. P. 106–150. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.106150.
22. Niemczewski B. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions // Ultrasonics Sonochemistry. 2014. Vol. 21, iss. 1. P. 354–359.
23. Pan W., Yi R., Liao Z., Yang L. Experimental study on microbial desulphurization of sulfide ores and self-heating simulation of ore heaps under ultrasonic and microwave // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 164. P. 435–448. DOI: 10.1016/j.psep.2022.06.033.

References

1. Blayda I. A., Vasilyeva T. V. Influence of ultrasound on the processes of bioleaching of metals and desulfurization of coals. Microbiology and biotechnology, no. 4, pp. 6–20, 2017. DOI: [http://dx.doi.org/10.18524/2307-4663.2017.4\(40\).119111](http://dx.doi.org/10.18524/2307-4663.2017.4(40).119111). (In Rus.).
2. Vikulin P. D., Vikulina V. B. Influence of ultrasound on water pH change // Water and ecology: problems and solutions, no. 4, pp. 3–8, 2019. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.4.3-8. (In Rus.).
3. Bayshulakov A. A., Glembotky V. A., Kirillov O. D., Kolchanova A. E., Sokolov M. A., Yakubovich I. A. Ultrasound in mineral processing. Alma-Ata: Nauka, 1972. (In Rus.).

4. Zarembo L. K. Acoustic currents. In: Physics and Technology of Powerful Ultrasound. In 2 vol. Powerful ultrasonic fields. Ed. L. D. Rozenberg. Moscow: Nauka, 1968. (In Rus.).
5. Iodis V. A., Trukhin Yu. P. Development of an enlarged flow cascade bacterial-chemical reactor with ultrasonic activation for bacterial-chemical processing of cobalt-copper-nickel ores. Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal), no. 11, pp. 136–146, 2021. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_19_136. (In Rus.).
6. Kortnev A. V., Protopopov R. V. On the effect of ultrasound on the formation of hydrogen peroxide. Tr. VI All. Acoustic conf. Moscow: Acoustic Institute Publ., 1968. (In Rus.).
7. Korchevenkov S. A., Afanasova A. V., Upraviteleva A. A., Kalmykova T. D. Review of influences for controlling the rheological properties of suspensions in the processing of mineral and hydrocarbon raw materials. Scientific aspect, vol. 7, no. 4, pp. 819–826, 2018. (In Rus.).
8. Revnitsev V. I., Dmitriev Yu. G. The use of ultrasound for cleaning harmful impurities of artificial abrasive materials. The use of ultrasound in mechanical engineering. Moscow: TsINTIAM, 1963. (In Rus.).
9. Rosenberg L. D. cavitation area. In: Physics and Technology of Powerful Ultrasound. Vol. 2. Powerful ultrasonic fields / ed. L. D. Rozenberg. Moscow: Nauka, 1968. (In Rus.).
10. Trukhin Yu. P., Balykov A. A., Vainshtein M. B. Bacterial-chemical leaching of cobalt-copper-nickel ores and technological scheme for processing productive solutions of nickel and cobalt. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal), no. 12, pp. 5–22, 2017. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-35-5-22. (In Rus.).
11. Trukhin Yu. P., Iodis V. A., Khaynasova T. S. Microwave and ultrasound activation of the kinetics of bacterial-chemical processes of leaching of cobalt-copper-nickel ores from the Shanuch deposit. Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal), no. 11, pp. 113–123, 2021. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_19_113. (In Rus.).
12. Khaynasova T. S. Factors influencing the bacterial-chemical processes of processing sulfide ores. Notes of the Mining Institute, vol. 235, pp. 47–54, 2019. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.47. (In Rus.).
13. Khan G. A., Panteleeva N. F., Smirnov Yu. R., Vinogradova I. N. Effect of water treated with ultrasonic vibrations on the flotation of sulfide minerals. In: «The use of ultrasound in metallurgical processes». Moscow: Metallurgiya, 1971. (In Rus.).
14. Chernykh S. I. On the issue of studying the effect of ultrasound, magnetic fields and electric current on gold flotation. S. I. Chernykh, O. I. Rybakova, N. M. Lebedev, T. I. Zhirnova. Non-ferrous metallurgy, no. 6, pp. 15–23, 2003. (In Rus.).
15. Chubykin M. M. The study of ultrasonic dispersion on the minerals of Kimberlite ore: Proceedings of Irigiredmet, no. 12, pp. 16–22, 1968. (In Rus.).
16. Chanturia V. A., Minenko V. G., Samusev A. L., Ryazantseva M. V., Chanturia E. L., Koporulina E. V. Influence exerted by ultrasound processing on efficiency of leaching, structural, chemical, and morphological properties of mineral components in eudialyte concentrate. Journal of Mining Science, vol. 54, no. 2, pp. 285–291, 2018. DOI: 10.1134/S1062739118023641. (In Eng.).
17. Chi P., Chaoyue Z., Qinfeng L., Shilong Z., Yu S., Hairui L., Jianhong F. Erosion characteristics and failure mechanism of reservoir rocks under the synergistic effect of ultrasonic cavitation and micro-abrasives. Advanced Powder Technology, vol. 32, pp. 4391–4407, 2021. (In Eng.).
18. Kang W., Xun H., Kong X., Li M. Effects from changes in pulp nature after ultrasonic conditioning on high-sulfur coal flotation. Mining Science and Technology, vol. 19, pp. 498–507, 2009. (In Eng.).
19. Kozmus G., Zevnik J., Hocevar M., Dular M., Petkovsek M. Characterization of cavitation under ultrasonic horn tip – Proposition of an acoustic cavitation parameter. Ultrasonics Sonochemistry, vol. 89, pp. 106–159, 2022. (In Eng.).
20. Lu J., Wang N., Yuan Z., Zhang Q., Li L., Wang Z. The effects of ultrasonic wave on heterogeneous coagulation and flotation separation of pentlandite-serpentine. Minerals Engineering, Vol. 188, 2022. Web. 21.04.2023. https://www.researchgate.net/publication/363363455_The_effects_of_ultrasonic_wave_on_heterogeneous_coagulation_and_flotation_separation_of_pentlandite-serpentine. (In Eng.).
21. Mao Y., Xia W., Peng Y., Xie G. Ultrasonic-assisted flotation of fine coal: A review. Fuel Processing Technology, vol. 195, pp. 106–150, 2019. (In Eng.).
22. Niemczewski B. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions. Ultrasonics Sonochemistry, vol. 21, iss. 1, pp. 354–359, 2014. (In Eng.).
23. Pan W., Yi R., Liao Z., Yang L. Experimental study on microbial desulphurization of sulfide ores and self-heating simulation of ore heaps under ultrasonic and microwave. Process Safety and Environmental Protection, vol. 164, pp. 435–448, 2022. (In Eng.).

Информация об авторе

Иодис Валентин Алексеевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ)

ДВО РАН), г. Петропавловск-Камчатский, Россия; iodisva@mail.ru. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых.

Information about the author

Iodis Valentin A., candidate of engineering sciences, leading researcher, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; iodisva@mail.ru. Research interests: Mineral enrichment.

Для цитирования

Иодис В. А. Разработка системы контроля параметров рудной пульпы в процессе ультразвуковой обработки // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 3. С. 45–55. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-3-45-55.

For citation

Iodis V. A. Development of a System for Monitoring the Parameters of ore Pulp in the Process of Ultrasonic Treatment // Transbaikal State University Journal. 2023. Vol. 29, no. 3. P. 45–55. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-3-45-55.