

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ АППАРАТА
ДЛЯ МИКРОДЕЗИНТЕГРАЦИИ МИНЕРАЛЬНЫХ
КОМПОНЕНТОВ В ГИДРОСМЕСЯХ**

Хрунина Н.П.

Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

Аннотация. Актуальность и цель исследования. Увеличение ресурсного потенциала страны зависит от расширения освоения природных и техногенных золотоносных россыпей Дальневосточного региона, большая часть которых представлена глинистой составляющей с повышенным содержанием мелких фракций. Особое значение приобретает развитие более совершенных систем, обеспечивающих разрушение микроструктурных связей глинистых минералов. Развиваются теоретические исследования и методы расчета для проектирования установок, инициирующих разрушение структурных связей минеральной составляющей в гидросмесях и работающих на основе модулирования гидродинамических воздействий с инициированием ударных нагрузок. **Цель работы.** Разработаны технические решения, обеспечивающие повышение технологического уровня добычи полезного ископаемого при переработке высокоглинистых песков россыпей за счет снижения потерь мелких и тонких частиц ценных компонентов путем встраивания в технологический цикл активизирующих микродезинтеграцию установок с обеспечением образования гидродинамических эффектов, способствующих усилению осцилляций посредством изменения скоростного режима. **Результаты.** На основе аналитического расчета получены данные по изменению массовой гидродинамической мощности и термодинамического потенциала системы в процессе деструкции минеральной составляющей гидросмеси в предлагаемой автором установке, моделирующей гидродинамические эффекты с учетом объемного расхода гидросмеси. В статье предлагается технологическая схема переработки с использованием аппарата новой конструкции для микродезинтеграции с последующим извлечением ценных минералов в тонкослойных потоках гравитационно-динамическим способом и выщелачиванием. Расчетами установлены параметры управления процессом микродезинтеграции минеральных частиц на первой ступени турбулизации в генераторе. Определяющую роль играет изменение гидродинамической силы струи, выходящей из сопла при варьировании объемного расхода гидросмеси и скорости потока гидросмеси. Изменение удельной межфазной поверхности глинистых минеральных частиц зависит также от удельной поверхностной энергии и термодинамического потенциала системы. Расчетами установлено, что при использовании центробежного насоса ПР 12,5/12,5-СП с объемным расходом гидросмеси 12 м³/ч термодинамический потенциал системы значительно увеличивается, стимулируя увеличение удельной межфазной поверхности системы частиц на пять порядков по сравнению с исходными значениями. **Выводы.** Развитие исследований по проектированию гравитационных установок нового типа позволит адаптировать их к использованию на природных высокоглинистых и техногенных объектах россыпей с высоким содержанием мелкого золота. Применение гидродинамического генератора, активизирующего микродезинтеграцию в гидродинамических потоках, сократит потери тонких частиц ценных компонентов и улучшит эксплуатационные показатели по обслуживанию комплекса.

Ключевые слова: высокоглинистые пески, микродезинтеграция, термодинамический потенциал, гидродинамический генератор

Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения Российской академии наук», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075-15-2021-663.

© Хрунина Н.П., 2023

Для цитирования

Хрунина Н.П. Совершенствование конструкции аппарата для микродезинтеграции минеральных компонентов в гидросмесях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-5-14>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

IMPROVING THE DESIGN OF THE DEVICE FOR MICRODISINTEGRATION OF MINERAL COMPONENTS IN HYDRAULIC MIXTURES

Khrunina N.P.

Mining Institute, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. Relevance and objective of the study. An increase in the resource potential of the country depends on the expansion of the development of natural and man-made gold-bearing placers of the Far Eastern region, most of which are represented by a clay component with a high content of fine fractions. It is particularly important to develop more advanced systems that ensure the destruction of microstructural bonds of clay minerals. Theoretical studies and calculation methods are being developed for the design of installations that initiate the destruction of the structural bonds of the mineral component in hydraulic mixtures and work on the basis of modulation of hydrodynamic effects with the initiation of shock loads. **Objective.** Development of a technical solution that provides an increase in the technological level of mineral extraction in the processing of high-clay sands of placers by reducing the loss of small and fine particles of valuable components by introducing installations, activating microdisintegration, into the technological cycle with the formation of hydrodynamic effects that contribute to the strengthening of oscillations by changing the speed mode. **Results.** The analytical calculation served as a basis for obtaining data on the change in the mass hydrodynamic power and thermodynamic potential of the system in the process of destruction of the mineral component of the hydraulic mixture in the proposed installation, which simulates hydrodynamic effects taking into account the volumetric flow rate of the hydraulic mixture. The paper proposes a process flow chart of processing using a device of a new design for microdisintegration with the subsequent extraction of valuable minerals in thin layer flows by gravity-dynamic method and leaching. The calculations established the parameters for controlling the process of microdisintegration of mineral particles at the first stage of creating turbulence in the generator. The decisive role is attributed to the change in the hydrodynamic force of the jet coming out of the nozzle with the variation of the volumetric flow rate of the hydraulic mixture and the flow rate of the hydraulic mixture. The change in the specific interfacial surface of clay mineral particles also depends on the specific surface energy and the thermodynamic potential of the system. Calculations have established that when using a central centrifugal pump, PR 12.5/12.5-SP, with a volumetric flow rate of a hydraulic mixture of 12 m³/h, the thermodynamic potential of the system increases significantly, stimulating an increase in the specific interfacial surface of the particle system by five orders of magnitude compared to the original values. **Conclusions.** The development of research on the design of gravity installations of a new type will make it possible to adapt them to use on natural high-clay and man-made placers with a high content of fine gold. The use of a hydrodynamic generator, which activates microdisintegration in hydrodynamic flows, will reduce the loss of fine particles of valuable components and improve the operational performance of the complex maintenance.

Keywords: high-clay sands, microdisintegration, thermodynamic potential, hydrodynamic generator

The research was conducted using resources of the Research Equipment Sharing Center, the Research Data Processing and Storage Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences funded by the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project No. 075-15-2021-663.

For citation

Khrunina N.P. Improving the Design of the Device for Microdisintegration of Mineral Components in Hydraulic Mixtures. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 5-14. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-5-14>

Введение

Интенсификация освоения месторождений цветных металлов в Дальневосточном регионе России существенно зависит от вовлечения в эксплуатацию россыпных месторождений. Интенсивно идет вовлечение в эксплуатацию новых типов россыпей, ранее не относившихся к промышленным объектам по содержанию ценных

компонентов и их составу. Для обеспечения ресурсной составляющей расширяется освоение техногенных объектов, большая часть которых представлена глинистыми породами. Кроме глинистой составляющей месторождения имеют повышенное содержание мелких и тонких частиц ценных компонентов. Кроме золота в россыпях присутствуют анатаз TiO₂ (Ti – 59,9%), андалузит (Al₂O₃ – 63,1% и SiO₂ – 36,9%), пиро-

морфит ($PbO - 82,0\%$), борнит ($Cu - 63,3\%$), самородный висмут Bi и висмутин Bi_2S_3 , вольфрамит, галенит, другие минералы и горные породы. На значительной части месторождений содержание мелкого золота фракции размером менее $0,5$ мм достигает 90% с преобладанием фракций размером менее $0,3$ мм до 88% .

В настоящее время потери мелкого и тонкого золота в процессе эксплуатации высокоглинистых россыпей составляют величину от 40 до 80% . Низкая естественная влажность и присутствие глинистых минералов, которые образуют трудно-разрушаемые структурные связи, усложняет процесс глубокой дезинтеграции песков до микроуровня [1-7]. Увеличение капитальных и энергетических затрат при эксплуатации промывочных агрегатов зависит от технологических параметров и функциональных особенностей установок. Особая роль отводится процессам дезинтеграции. Интенсифицируют дезинтеграционные процессы прямое механическое воздействие на конгломераты песков и гидродинамические эффекты в процессе промывки и осаждения. В настоящее время для обеспечения ресурсосбережения при разработке золотосодержащих россыпей активное развитие получают технологические инновации глубокой и комплексной переработки природного и техногенного сырья. Исследована динамика формирования глинистого окатыша в промывочном барабане и процессы мокрого рудного самоизмельчения глинистых песков [8, 9]. Учитывая также экологический аспект, получают развитие нетрадиционные методы вскрытия минералов посредством энергетического воздействия [10-12]. Данные направления исследований достаточно энергоемкие и находятся в развитии. Проанализированы теоретические предпосылки применения различных методов нелинейной акустики при обогащении полезных ископаемых. В результате промышленных испытаний технологии первичного обогащения платиноносных песков с использованием звукоизлучающих устройств получено увеличение извлечения мелкодисперсных фракций платины на 75% [13].

По результатам промышленных испытаний вибрационного грохота ГИТ-32 на бедных легкопромывистых песках установлена целесообразность его использования на промывочных установках ПГС-700 и ПКС-1200 вместо скрубберов АСК-700 и АСК-1200. Эффективность грохочения на грохоте ГИТ-32 составила $95,6-96,6\%$ [14]. Путем ступенчатого повышения разрушающих нагрузок при измельчении техногенного сырья

получено снижение процессов шламообразования. Определены оптимальные режимы разрушения минеральных сростков техногенного сырья [15]. Подчеркивается, что для удаления глинистых примесей – основного источника образования шламов – в схему обогащения необходимо включить операцию предварительного дезинтегрирования [16]. Получает развитие идея использования механоактивации в гидрометаллургических и обогатительных процессах для обеспечения энерго- и ресурсосбережения. Подчеркивается, что механоактивация способствует нарушению термодинамического равновесия систем и инициирует химическое взаимодействие.

Развиваются исследования, в основе которых лежат процессы турбулентности, кавитации, гидравлических ударов, обеспечивающих микродезинтеграцию твердой составляющей гидросмесей [17-29]. Новым подходом для решения поставленной задачи может быть развитие принципиально новой техники с использованием кавитационно-гидродинамических эффектов. Предложено устройство [30], инициирующее гидродинамические колебания посредством гибких элементов. Однако данное конструктивное решение дискретно-импульсного ввода энергии не обеспечит эффективность дезинтеграции минеральных компонентов гидросмесей на высоких скоростях. Получат развитие процессы истечений струй и потоков минеральных гидросмесей с использованием стационарных элементов. Исследования дезинтеграции высокоглинистых песков с повышенным содержанием ценных компонентов мелких фракций лежат в области происходящих гидродинамических взаимодействий гидросмеси с элементами конструкций и физико-химических явлений. Срабатывают разнообразные эффекты понижения удельной поверхностной энергии частиц.

Целью исследования является разработка технического решения, обеспечивающего повышение технологического уровня добычи полезного ископаемого при переработке высокоглинистых песков россыпей за счет снижения потерь мелких и тонких частиц ценных компонентов путем встраивания в технологический цикл активизирующих микродезинтеграцию установок с обеспечением образования гидродинамических эффектов, способствующих усилению осцилляций посредством изменения скоростного режима.

Результаты исследования

В настоящее время в Хабаровском крае, Амурской области и Еврейской автономной об-

ласти России выявлено более 50-ти участков золотоносных месторождений с повышенным содержанием глинистой фракции в сочетании с мелким и тонким золотом. Все они имеют фракции золота -0,5 мм от 54 до 90-100%, при этом половина из них имеет фракции -0,5 мм свыше 80%. Примером может служить россыпь ручья Генриховский с повышенным содержанием мелкой глинистой фракции в составе рыхлых отложений – 76,4%. Ситовый анализ золота по классам крупности показал содержание фракции -0,63 +0,16 мм – 87,8%, фракции -0,63 +0,25 мм – до 12% и фракции -0,16 мм – до 0,2%. Почти 90% составляет мелкое золото.

Известно, что использование для переработки россыпей только традиционных гравитационных установок неминуемо приведет к существенным потерям ценных компонентов. Для решения вопроса извлечения благородных металлов более технологически эффективными средствами предложено использовать системы, в основе которых лежат методы, обеспечивающие активизацию микродезинтеграции. Это достигается путем создания условий для устойчивого процесса подготовки минеральных компонентов посредством разрушения минеральной составляющей усилением полей гидродинамических и кавитационных явлений в генераторе. Институтом горного дела ДВО РАН предлагается комплекс средств для разработки высокоглинистых россыпей с мелким золотом.

На рис. 1 представлен общий вид технологической схемы переработки высокоглинистых россыпей с повышенным содержанием мелких и тонких частиц золота посредством встраивания в цикл разработанных установок. Комплекс технологических средств снабжен установкой многоуровневого типа для извлечения ценных минералов в тонкослойных потоках гравитационно-динамическим способом [31] и гидродинамическими генераторами, не требующими дополнительных энергозатрат [32, 33].

Интенсификация процесса переработки труднопромывистых высокоглинистых песков россыпей с преимущественно мелким золотом обеспечивается автоматизацией процесса гравитационного разделения и активацией микродезинтеграции посредством гидродинамических эффектов в генераторах (рис. 2). После классификации и гравитационного разделения гидро-смесь с размером фракций менее 6 мм направляется для активации в гидродинамический генератор и на уста-

новку многоуровневого типа. После многоуровневой установки пульпа направляется снова в гидродинамический генератор для активации и дополнительного разрушения микросвязей глинистых частиц под действием энергии давления струи, изменения скоростного режима потока и кавитационных эффектов.



Рис. 1. Технологическая схема переработки высокоглинистых россыпей с мелким золотом
Fig. 1. The process flow chart of processing high-clay placers with fine gold

Подвергнутая интенсивному воздействию в гидродинамическом генераторе пульпа направляется в емкость для выщелачивания и сорбции. Активация стимулирует физико-химический процесс окислителей в процессе выщелачивания [34]. По сравнению с ультразвуковыми и механическими активационными установками гидродинамический генератор существенно экономичен, так как отсутствуют дополнительные затраты на электроэнергию при осуществлении процесса активации. Обеспечение устойчивости процесса разрушения песков с глинистой составляющей, образовавшейся в ходе кавитации и гидродинамических осцилляций, является основополагающим фактором при подготовке к выделению микрочастиц ценных компонентов.

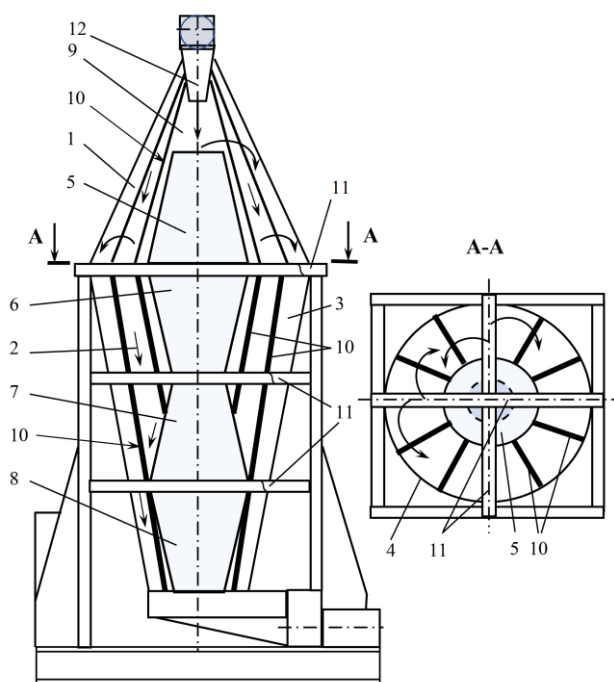


Рис. 2. Гидродинамический генератор:
1, 2 – профилированные каналы; 3 – стенка корпуса; 4 – корпус; 5-8 – стационарные кавитационные элементы; 9 – диффузор; 10 – ребра жесткости; 11 – крестообразные опорные штанги; 12 – сопло

Fig. 2. A hydrodynamic generator: 1, 2 are profiled channels; 3 is the wall of the casing; 4 is a casing; 5-8 are stationary cavitation elements; 9 is a diffuser; 10 is stiffeners; 11 is cross-shaped support rods; 12 is a nozzle

Технические и технологические разработки

Предлагается конструкция гидродинамического генератора (см. рис. 2) с профилированными каналами 1, 2, изменяющими направление потока гидросмеси и скоростной режим. Каналы образуются между стенкой 3 корпуса 4 и последовательно установленными стационарными кавитационными элементами 5-8 в виде конусообразных раскателей. Кавитационные элементы представляют собой монолитную систему, установленную по центру диффузора 9 и корпуса 4, жестко соединенного с диффузором 9. Конусообразные раскатели установлены с чередованием прямой и обратной конусности по ходу продвижения потока гидросмеси для формирования зон, способствующих усилению осцилляций посредством изменения скоростного режима. Интенсификация процесса усиливается посредством прямых ребер жесткости 10 и крестообразных опорных штанг 11, установленных для обеспечения градиента давления с превышением

предела прочности микрочастиц. При подаче высокоскоростной струи из сопла 12 генератора на плоскую поверхность конусообразного раскателя 5 происходит гидродинамический эффект, сопровождающийся турбулизацией потока.

Скоростной режим гидросмеси усиливает влияние гидродинамического давления и формируемого термодинамического потенциала минеральной составляющей гидросмеси. На входе в генератор гидродинамическая сила P , Н, будет зависеть от объемного расхода гидросмеси Q , $\text{м}^3/\text{с}$, скорости потока струи V , $\text{м}/\text{с}$, падающего на препятствие в виде раскателя, и равновесной плотности гидросмеси ρ :

$$dP = \rho \cdot Q \cdot d \cdot V. \quad (1)$$

Равновесная плотность ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$, определится с учетом объемного содержания в гидросмеси минеральной составляющей и воды. Скорость потока V , $\text{м}/\text{с}$, будет зависеть от объемного расхода гидросмеси Q , $\text{м}^3/\text{с}$, и диаметра сопла d , м :

$$V = \frac{4Q}{3,14d^2}. \quad (2)$$

Происходят изменения в сторону активного разрушения структурных и физико-механических связей частиц. Для определения в выбранном размерном диапазоне измерения удельной межфазной поверхности S , м^1 , системы минеральных частиц используем зависимость [33]

$$S = S_0 \exp(E\sigma^{-1}), \quad (3)$$

где S_0 – исходная удельная межфазная поверхность системы частиц при времени $t = 0$, принимаем $S_0 = 1,00124 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$; E – изменение термодинамического потенциала поверхностей частиц [4] для гетерогенной системы, $\text{Н}/\text{м}$; σ – удельная поверхностная энергия частиц дисперсоида, для глиен составляет $0,780 \text{ Дж}/\text{м}^2$.

Изменение термодинамического потенциала системы dE зависит от конструктивных особенностей установки и коэффициента полезного действия η , энергии давления струи W , $\text{Н}/\text{м}^2$, турбулентности d_t , м , образующейся в результате взаимодействия потока с поверхностью, и изменения времени воздействия подводимой энергии dt . Размер диаметра d_m турбулентности принимаем в нашем случае равным $0,3 \text{ м}$.

$$dE = \eta \cdot W \cdot d_t \cdot dt. \quad (4)$$

Существенным фактором является подача гидросмеси в установку посредством насосной

системы. Для расчетов выбран песковый насос ПР 12,5, предназначенный для перекачивания гидросмесей.

На **рис. 3** представлена зависимость изменения термодинамического потенциала системы поверхностей частиц от расхода гидросмеси и времени протекания процесса, полученная расчетным путем по формуле (4). На **рис. 4** представлена зависимость удельной межфазной поверхности частиц S от расхода гидросмеси Q , полученная с учетом теоретической формулы (3).

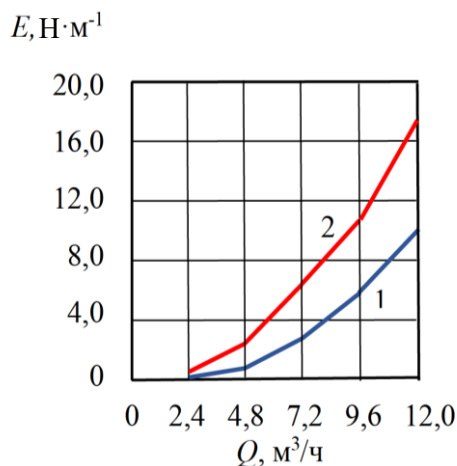


Рис. 3. Зависимость изменения термодинамического потенциала поверхностей частиц от расхода гидросмеси при времени 2 с (1) и 4 с (2)

Fig. 3. Dependence between thermodynamic potential of the surface of the particles and the flow rate of the hydraulic mixture at 2 s (1) and 4 s (2)

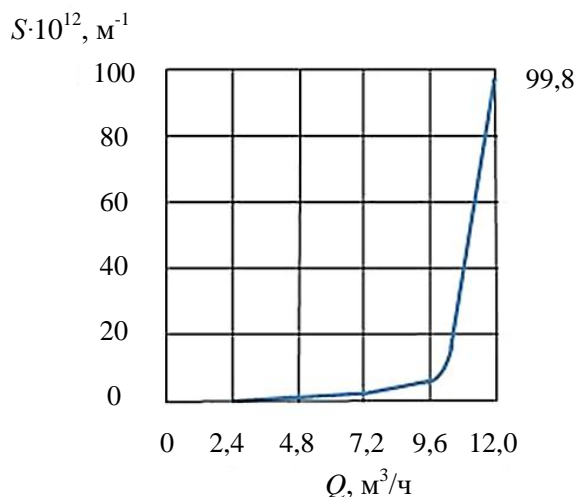


Рис. 4. Зависимость изменения удельной межфазной поверхности системы частиц S от расхода Q гидросмеси при времени 2 с

Fig. 4. Dependence between the specific interfacial surface of particle system S and flow rate Q of the hydraulic mixture at 2 seconds

Процесс деструкции высокоглинистого минерального сырья на микроуровне посредством преобразования скоростного режима подачи гидросмеси в генератор вполне управляем и эффективен. В результате расчетов установлено, что определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц на первой ступени турбулизации играет изменение гидродинамической силы струи, зависящей от скорости потока, объемного расхода и плотности гидросмеси, а также термодинамического потенциала турбулизации. Преобразование структурных связей влияет на морфометрические и энергетические параметры системы. При возрастании скорости потока и расхода в 5 раз термодинамический потенциал системы, а также давление и массовая гидродинамическая мощность увеличиваются в среднем в 25 раз. Удельная межфазная поверхность системы частиц существенно изменяется от $0,002 \cdot 10^{12}$ до $99,8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-1}$ – на пять порядков. Достигнутый эффект преобразования может использоваться в обогащительных процессах, активизируя физико-химическое влияние реагентов.

В генераторе отсутствуют двигатели для вращения элементов конструкции, энергоемкость его минимальная. Интенсификация процесса усиливается посредством ребер жесткости и крестообразных опорных штанг, установленных для обеспечения градиента давления с превышением предела прочности микрочастиц и формируемого термодинамического потенциала минеральной составляющей гидросмеси. Ребра жесткости и опорные штанги обеспечивают устойчивость конструкции и эксплуатационную надежность системы.

Заключение

Установлено значительное количество золотоносных россыпей с повышенным содержанием глинистой составляющей и мелкого и тонкого золота. Содержание фракций золота размером менее 0,5 мм содержится от 54 до 90-100%, при этом половина из них имеет фракции -0,5 мм свыше 80%. Представлена схема переработки высокоглинистых россыпей с повышенным содержанием мелкого золота. Определены основные факторы интенсификации кинетики микродезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси посредством элементов конструкции генератора, моделирующих гидродинамические эффекты в процессе подготовки к обогащению на многоуровневой установке и выщелачиванию для дальнейшего извлечения микрочастиц ценного компонента. Посредством аналитических

расчетов осуществлен анализ изменения термодинамического потенциала и удельной межфазной поверхности системы минеральных частиц в процессе деструкции минеральной составляющей гидросмеси. Разработанное техническое решение обеспечит повышение технологического уровня добычи полезного ископаемого при переработке высокоглинистых песков россыпей за счет снижения потерь мелких и тонких частиц ценных компонентов, улучшения показателей по обслуживанию и эксплуатационной надежности элементов конструкции генератора.

Список источников

1. Алексеев В.С., Серый Р.С., Соболев А.А. Повышение извлечения мелкого золота на промывочном приборе шлюзового типа // Обогащение руд. 2019. №5. С. 13-18. DOI: 10.17580/or.2019.05.03
2. Мирзаханов Г.С., Литвинцев В.С. Состояние и проблемы освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в Дальневосточном регионе // Горный журнал. 2018. №10. С. 25-30. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.04
3. Мамаев Ю.А., Хрунина Н.П. Перспективы освоения глинистых россыпей Приамурья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. №55. С. 47-57.
4. Хрунина Н.П. Моделирование гидродинамических эффектов при микродезинтеграции высокоглинистых минеральных компонентов в гидросмеськах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 26-34. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34
5. Экологические основы рационального землепользования при освоении россыпных месторождений Дальнего Востока / Крупская Л.Т., Мамаев Ю.А., Хрунина Н.П., Литвинцев В.С., Пономарчук Г.П. Владивосток: Дальнаука, 1997. 35 с.
6. Хрунина Н.П., Стратечук О.В. Новые аспекты микродезинтеграции высокоглинистых песков россыпных и рудно-россыпных месторождений благородных металлов Дальневосточного региона: монография. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. 218 с. ISBN 978-5-7389-2686-0
7. Аленичев В.М. Геоинформационное обеспечение ресурсосбережения при разработке золотосодержащих россыпей // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. №4. С. 124-131. DOI: 10.25635/i0065-1538-8230-i
8. Карлина А.И. Применение процесса мокрого рудного самоизмельчения для дезинтеграции глины и песков металлоносных россыпей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. №10. С. 189-195.
9. Матвеев А.И., Ширман Г.В. Динамика формирования глинистого окатыша в процессе дезинтеграции высокоглинистых песков в промывочном барабане // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. №10. С. 266-268.
10. Пат. 2276727 РФ. Способ управления процессом трансформации золотосодержащей породы / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 20.05.2006. Бюл. № 14.
11. Развитие технологических инноваций глубокой и комплексной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов / Чантурия В.А., Шадрюнова И.В., Горлова О.Е., Колодежная Е.В. // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. №1. С. 159-171. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-159-171
12. Пат. 2200629 РФ. Грохот-дезинтегратор с интенсификацией кавитации комбинированным воздействием ультразвука / Н.П. Хрунина; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 20.03.2003. Бюл. № 8.
13. Бахарев С.А., Козлов А.П. К вопросу использования методов нелинейной акустики при обогащении полезных ископаемых и безреагентной очистке промышленных сточных вод // Маркшейдерия и недропользование. 2013. №1(63). С. 41-49.
14. Промышленные исследования по изучению эффективности грохочения песков при внедрении в схему промывочных установок грохота ГИТ-32 / Коростовенко В.В., Медведь Н.В., Морозова Е.Л., Морозов В.Н. // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений: сб. тр. XI Междунар. науч.-техн. конф. в рамках Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2022. С. 119-122.
15. Возможность стадийной дезинтеграции и механической активации в процессах обогащения техногенного оловосодержащего сырья / Уракаев Ф.Х., Шумская Л.Г., Кириллова Е.А., Кондратьев С.А. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. №3. С. 158-167. DOI: 10.15372/FTPRPI20210315
16. Рочев В.Ф., Мельников А.Е. Исследование механизма разрушения мерзлых глинистых пород в водной среде // Успехи современного естествознания. 2018. №12-2. С. 380-384.
17. Li W., Yang Y., Shi W., Zhao X., Li W. Correction and evaluation of the cavitation model taking into account the thermodynamic effect // Mathematical Problems in Engineering. 2018, no. 10, pp. 1-11. DOI: 10.1155/2018/7217513
18. Decaix J., Goncalves E. Simulation of compression effects in turbulent cavitating flows // European Journal of Mechanics. 2013, vol. 39, pp. 11-31. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2012.12.001
19. Jing L., Weiling X, Bu C. Stratification effect of air bubble on the shock wave from the collapse of cavitation bubble // Journal of Fluid Mechanics, 2021, vol. 919, A16. DOI: 10.1017/jfm.2021.368
20. Xun Sun, Songying Chen, Jingting Liu, Shan Zhao, Joon Yong Yoon. Hydrodynamic cavitation: a promising technology for the industrial synthesis of nano-

- materials. URL: <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00259> (Дата обращения: 06.06.2023).
21. Richard Dvorsky, Jiri Lunacek, Ales Sliva Dynamics analysis of cavitation disintegration of microparticles during nanopowder preparation in a new Water Jet Mill (WJM) device September 2011 // *Advanced Powder Technology*. 2011, vol. 22(5), pp. 639-643. DOI: 10.1016/j.apt.2010.09.008
 22. Mukun Li, Hongjian Ni, Guan Wang, Ruihe Wang. Simulation of Thermal Stress Effects in Submerged Continuous Water Jets on the Optimal Standoff Distance during Rock Breaking // *Powder Technology*. 2017, vol. 320, pp. 445-456. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.07.071
 23. Zhang X., Carbone M., Bragg A.D. Lagrangian model for passive scalar gradients in turbulence // *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, vol. 964. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.375>.
 24. Dvorski R., Svoboda L., Troykova Y., Bednář J. Cavitation Disintegration of Microparticles and Nanoparticles in Dense Liquid Dispersions // *Conference: TechConnect World 2015*, At: Washington DC, USA, vol. 2. DOI: 10.13140/RG.2.1.3345.9364
 25. Ананьев К.М., Алексеева Е.А., Твердохлебов В.П. Применение метода кавитации для очистки подтоварной воды нефтяных месторождений // *Успехи современного естествознания*. 2021. №5. С. 45-50. DOI: 10.17513/use.37623
 26. Гордейчук Т.В., Казачек М.В. О влиянии неионогенных поверхностно-активных веществ на эмиссию NA^* при сонолюминесценции водных растворов $NaCl$ // *Журнал физической химии*. 2019. Т. 93. №5. С. 793-796. DOI: 10.1134/S004445371905011X
 27. Получение водорода в акустоплазменном разряде в жидкости / Булычев Н.А., Кириченко М.Н., Аврюшкин А.С., Казарян М.А. // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. №3. С. 226-228. DOI: 10.15372/AOO20180313
 28. Пат. 2209974 РФ. Геотехнологический комплекс с многоступенчатой дезинтеграцией / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 10.08.2003. Бюл. № 22.
 29. Мамаев Ю.А., Хрунина Н.П. Определение оптимальных начальных параметров звукового воздействия на пульпу в зумпфовом накопителе при открытой разработке высокоглинистых россыпей // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № 7. С. 187-191.
 30. Пат. 2476261 РФ. Способ возбуждения акустических колебаний в текучей среде и устройство (варианты) для его осуществления / В.П. Терехин, Д.М. Пастухов, М.Е. Пастухов. Опубл. 27.02.2013. Бюл. № 6.
 31. Пат. 2187373 РФ. Многоуровневая установка для извлечения ценных минералов / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев, О.В. Стратечук, Т.О. Хрунин; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Опубл. 20.08.2002. Бюл. № 23.
 32. Хрунина Н.П. Совершенствование комплекса средств для переработки высокоглинистых золотоносных песков россыпей // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2021. Т. 19. №2. С. 14-22. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-14-22
 33. Хрунина Н.П. Влияние гидродинамических эффектов на структурные изменения дисперсоида в процессе микродезинтеграции // *Науки о Земле и недروпользование*. 2022. Т. 45. №3(80). С. 294-304. DOI: 10.21285/2686-9993-2022-45-3-294-304
 34. Хрунина Н.П., Прохоров К.В. Совершенствование процессов переработки золотосеребряных упорных руд комплексного месторождения благородных металлов // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2019. №2. С. 4-12. DOI: 10.17073/0021-3438-2019-2-4-12

References

1. Alekseev V.S., Seryi R.S., Sobolev A.A. Increasing the extraction of fine gold on a sluice-type flushing device. *Obogashchenie rud* [Ore Enrichment]. 2019;(5):13-18. DOI: 10.17580/or.2019.05.03. (In Russ.)
2. Mirzekhanov G.S., Litvintsev V.S. State and problems of development of man-made placer deposits of precious metals in the Far Eastern region. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2018;(10):25-30. DOI: 10.17580/gzh.2018.10.04. (In Russ.)
3. Mamaev Yu.A., Khrunina N.P. Prospects for the development of clay placers of the Amur region. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2009;(S5):47-57. (In Russ.)
4. Khrunina N.P. Modeling of hydrodynamic effects in microdisintegration of high-clay mineral components in slurries. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022;20(3):26-34. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34. (In Russ.)
5. Krupskaya L.T., Mamaev Yu.A., Khrunina N.P., Litvintsev V.S., Ponomarchuk G.P. *Ekologicheskie osnovy ratsionalnogo zemlepolzovaniya pri osvoenii rossypanykh mestorozhdeniy Dalnego Vostoka* [Ecological background of a reasonable land use in the development of placer deposits in the Far East]. Vladivostok: Dalnauka, 1997, 35 p. (In Russ.)
6. Khrunina N.P., Stratechuk O.V. *Novye aspekty mikrodezintegratsii vysokoglinistykh peskov rossypanykh i rudno-rossypanykh mestorozhdeniy blagorodnykh metallov Dalnevostochnnogo regiona: monografiya* [New aspects of microdisintegration of high-clay sands of placer and ore-placer deposits of precious metals of the Far Eastern region: monograph]. Khabarovsk: Publishing House of Pacific National University, 2018, 218 p. ISBN 978-5-7389-2686-0. (In Russ.)
7. Alenichev V.M. Geoinformation support of resource saving in the development of gold-bearing placers.

- Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences]. 2020;(4):124-131. DOI: 10.25635/i0065-1538-8230-i (In Russ.)
8. Karlina A.I. Application of the wet ore autogrounding process for the disintegration of clay and sands of metal-bearing placers. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2014;(10):189-195. (In Russ.)
 9. Matveev A.I., Shirman G.V. Dynamics of clay pellet formation in the process of disintegration of high-clay sands in the washing drum. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2011;(10):266-268. (In Russ.)
 10. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A. *Sposob upravleniya protsessom transformatsii zolotosoderzhashchey porody* [Method of controlling the process of transformation of gold-bearing rock]. Patent RU, no. 2276727, 2006.
 11. Chanturiya V.A., Shadrinova I.V., Gorlova O.E., Kolodezhnaya E.V. Development of technological innovations of deep and complex processing of technogenic raw materials in the context of new economic challenges. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [Proceedings of Tula State University. Earth Sciences]. 2020;(1):159-171. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-159-171. (In Russ.)
 12. Khrunina N.P. *Grokhot-dezintegrator s intensifikatsiyey kavitatsii kombinirovannym vozdeystviem ultrazvuka* [A screen-disintegrator with intensification of cavitation by combined exposure to ultrasound]. Patent RU, no. 2200629, 2003.
 13. Bakharev S.A., Kozlov A.P. On the use of methods of nonlinear acoustics in the processing of minerals and non-chemical treatment of industrial wastewater. *Marksheyderiya i nedropolzovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use]. 2013;(1(63)):41-49. (In Russ.)
 14. Korostovenko V.V., Medved N.V., Morozova E.L., Morozov V.N. Industrial research on the study of the efficiency of screening sands during the introduction of the GIT-32 screen into the scheme of washing installations. *Innovatsionnye geotekhnologii pri razrabotke rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniy: sb. tr. XI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. v ramkakh Uralskoy gornopromyshlennoy dekady* [Innovative geotechnologies in the development of ore and non-metallic deposits: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference as part of the Ural Mining Decade]. Yekaterinburg, 2022, pp. 119-122. (In Russ.)
 15. Urakaev F.Kh., Shumskaya L.G., Kirillova E.A., Kondratiev S.A. Possibilities of stage disintegration and mechanical activation in the processes of enrichment of technogenic tin-containing raw materials. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Physical and Technical Problems of Mineral Development]. 2021;(3):158-167. DOI: 10.15372/FTPRP120210315. (In Russ.)
 16. Rochev V.F., Melnikov A.E. Study on the mechanism of destruction of frozen clay rocks in water environment. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Modern Natural Science]. 2018;(12-2):380-384. (In Russ.)
 17. Li W., Yang Y., Shi W., Zhao X., Li W. Correction and evaluation of the cavitation model taking into account the thermodynamic effect. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018;(10):1-11. DOI: 10.1155/2018/7217513
 18. Decaix J., Goncalves E. Simulation of compression effects in turbulent cavitating flows. *European Journal of Mechanics*. 2013;39:11-31. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2012.12.001.
 19. Jing L., Weiling X., Bu C. Stratification effect of air bubble on the shock wave from the collapse of cavitation bubble. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021;919: A16. DOI: 10.1017/jfm.2021.368.
 20. Xun Sun, Songying Chen, Jingting Liu, Shan Zhao, Joon Yong Yoon. Hydrodynamic cavitation: a promising technology for the industrial synthesis of nanomaterials. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00259>
 21. Richard Dvorsky, Jiri Lunacek, Ales Sliva. Dynamics analysis of cavitation disintegration of microparticles during nanopowder preparation in a new Water Jet Mill (WJM) device. *Advanced Powder Technology*. 2011;22(5):639-643. DOI:10.1016/j.apt.2010.09.008
 22. Mukun Li, Hongjian Ni, Guan Wang, Ruihe Wang. Simulation of thermal stress effects in submerged continuous water jets on the optimal standoff distance during rock breaking. *Powder Technology*. 2017;320:445-456. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.07.071
 23. Zhang X., Carbone M., Bragg A.D. Lagrangian model for passive scalar gradients in turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 2021;964. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.375>
 24. Dvorski R., Svoboda L., Troykova Y., Bednár J. Cavitation disintegration of microparticles and nanoparticles in dense liquid dispersions. Conference: TechConnect World 2015. 2015;2. DOI: 10.13140/RG.2.1.3345.9364
 25. Ananiev K.M., Alekseeva E.A., Tverdokhlebov V.P. Application of the cavitation method for the purification of produced water from oil fields. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in Modern Natural Science]. 2021;(5):45-50. DOI: 10.17513/use.37623. (In Russ.)
 26. Gordeychuk T.V., Kazachek M.V. Effect of nonionic surfactants on NA* emission during sonoluminescence of aqueous NaCl solutions. *Zhurnal fizicheskoy khimii* [Journal of Physical Chemistry]. 2019;93(5):793-796. DOI: 10.1134/S004445371905011X. (In Russ.)
 27. Bulychev N.A., Kirichenko M.N., Averyushkin A.S., Kazaryan M.A. Hydrogen production in acousto-plasma discharge in liquid. *Optika atmosfery i okeana* [Optics of Atmosphere and Oceans]. 2018;31(3):226-228. DOI: 10.15372/AOO20180313. (In Russ.)
 28. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A. *Geotekhnologicheskii kompleks s mnogostupenchatoy dezintegratsiyey* [Geotechnological complex with multistage disintegration]. Patent RU, no. 2209974, 2003.

29. Mamaev Yu.A., Khrunina N.P. Determination of the optimal initial parameters of the sound effect on the pulp in the sump accumulator during the open mining of high-clay placers. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin]. 2009;(7):187-191. (In Russ.)
30. Terekhin B.P., Pastukhov D.M., Pastukhov M.E. *Sposob возбужdeniya akusticheskikh kolebaniy v tekuchey srede i ustroystvo (varianty) dlya ego osushchestvleniya* [A method for excitation of acoustic vibrations in a fluid medium and a device (options) for its implementation]. Patent RU, no. 2476261, 2013.
31. Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Stratechuk O.V., Khrunin T.O. *Mnogourovnevaya ustanovka dlya izvlecheniya tsennykh mineralov* [A multi-level installation for the extraction of valuable minerals]. Patent RU, no. 2187373, 2002.
32. Khrunina N.P. Improving the complex of means for the processing of high-clay gold-bearing sands of placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021;19(2):14-22. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-14-22. (In Russ.)
33. Khrunina N.P. Influence of hydrodynamic effects on structural changes in dispersoid in the process of microdisintegration. *Nauki o Zemle i nedropolzovanie* [Earth Sciences and Subsoil Use]. 2022;45(3(80)):294-304. DOI: 10.21285/2686-9993-2022-45-3-294-304. (In Russ.)
34. Khrunina N.P., Prokhorov K.V. Improvement of processing gold-silver refractory ores of a complex deposit of precious metals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya* [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy]. 2019;(2):4-12. DOI: 10.17073/0021-3438-2019-2-4-12. (In Russ.)

Поступила 31.05.2023; принята к публикации 14.07.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 31/05/2023; revised 14/07/2023; published 25/09/2023

Хрунина Наталья Петровна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия.
Email: npetx@mail.ru. ORCID 0000-0001-8117-0922

Natalia P. Khrunina – PhD (Eng.), Lead Researcher, Mining Institute, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.
Email: npetx@mail.ru. ORCID 0000-0001-8117-0922