



МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ МИКРОДЕЗИНТЕГРАЦИИ ВЫСОКОГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ГИДРОСМЕСЯХ

Хрунина Н.П.

Хабаровский Федеральный исследовательский центр, Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия

Аннотация. В настоящее время рост ресурсного потенциала страны зависит от освоения глубокозалегающих месторождений, большая часть которых представлена глинистыми золотоносными россыпями с повышенным содержанием тонких и мелких фракций ценных компонентов. Данное обстоятельство зависит от развития более совершенных способов и установок, обеспечивающих разрушение структурных связей глинистых минералов. Особое значение приобретают теоретические исследования и численные методы расчета, пригодные для проектирования установок нового типа, исключающих использование дополнительных энергозатрат при разрушении структурных связей минеральной составляющей в гидросмесях и работающих на основе модулирования гидродинамических эффектов и кавитации. 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 результате расчетов установлено, что определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц на первой ступени турбулизации играет изменение термодинамического потенциала системы, зависящего от изменения массовой гидродинамической мощности системы и времени воздействия. При увеличении расхода и скорости потока в 5 раз величина давления, массовая гидродинамическая мощность и термодинамический потенциал системы увеличиваются в среднем в 25 раз. При уменьшении выходного диаметра сопла, согласно расчетным данным, массовая гидродинамическая мощность и термодинамический потенциал системы увеличивается в среднем в 2,8 раза. Развитие численных методов исследования и проектирования гравитационных установок нового типа позволит адаптировать их к использованию на объектах добычи полезных ископаемых. Прогнозируется при активизации микродезинтеграции сокращение потерь тонких частиц ценных компонентов, снижение потребления энергоресурсов и повышение экологической безопасности за счет использования гидродинамического эффекта преобразования среды непосредственно, в том числе в обогащательных процессах, обеспечивая снижение расхода поверхностно-активных веществ и реагентов.

Ключевые слова: высокоглинистые пески, микродезинтеграция, термодинамический потенциал, массовая гидродинамическая мощность, 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., 2022

Для цитирования

Хрунина Н.П. Моделирование гидродинамических эффектов при микродезинтеграции высокоглинистых минеральных компонентов в гидросмесях // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 26-34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34>



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

MODELING OF HYDRODYNAMIC EFFECTS IN MICRODISINTEGRATION OF HIGH-CLAY MINERAL COMPONENTS IN SLURRIES

Khrunina N.P.

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

Abstract. Now, the growth of Russia's resource potential depends on the development of deep-seated deposits, mostly represented by clay gold-bearing placers with a higher content of thin and fine fractions of valuable components. This circumstance depends on development of improved methods and facilities, breaking structural bonds of clay minerals. A particular importance is given to theoretical studies and numerical methods applied to design a new type of facilities, excluding the use of additional power consumption, when breaking structural bonds of mineral components in slurries and operating by modeling hydrodynamic effects and cavitation. The analytical calculations provided data on changes in mass hydrodynamic power and thermodynamic potential of the system, when destructing mineral components of slurries in the unit suggested by the author and modeling hydrodynamic effects subject to the volume flow of slurries. The calculations showed that a decisive role in microdisintegration of mineral particle at the first stage of turbulization was played by changes in thermodynamic potential of the system, depending on changes in mass hydrodynamic power of the system and exposure time. When consumption and flow rate increase by 5 times, pressure, mass hydrodynamic power and thermodynamic potential of the system increase by 25 times on average. When a nozzle exit diameter decreases, according to the calculated data, mass hydrodynamic power and thermodynamic potential of the system increase by 2.8 times on average. Development of numerical methods and design of a new type of gravitation facilities contribute to adapting them to the use at mining sites. When activating microdisintegration, it is expected that utility consumption will decrease and environmental safety will improve due to hydrodynamic effect of transforming environment directly, including in beneficiation processes, ensuring lower consumption of surfactants and chemical agents.

Keywords: high clay sands, microdisintegration, thermodynamic potential, mass hydrodynamic power, hydrodynamic generator

This research was carried out using the facilities of the Shared Knowledge Centre located at the Centre for Scientific Data Processing and Storage at the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Project No. 075-15-2021-663.

For citation

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, vol. 20, no. 3, pp. 26-34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-26-34>

Введение

Одним из важнейших факторов обеспечения ресурсной составляющей в Хабаровском крае является освоение глубокозалегающих и древних погребенных месторождений, большая часть которых представлена глинистыми золотоносными россыпями. Кроме глинистой составляющей месторождения имеют повышенное содержание мелких и тонких частиц ценных компонентов. На объектах месторождений Колчан, Каменистый, Кедровка, Рокосуевский, Ангочкан, Кайгачан, Благодатный-Майнура, Майский содержание мелкого золота фракции размером менее 0,5 мм составляет более 90%, с преобладанием большей частью фракций размером менее 0,3 мм – в некоторых случаях до 88% [1, 2].

В настоящее время потери мелкого и тонкого

золота в процессе эксплуатации высокоглинистых россыпей порой достигают 80%. Присутствие глинистых минералов, которые образуют трудноразрушаемые структурные связи, предопределяет усложнение процесса глубокой дезинтеграции песков до микроуровня. Естественная влажность проб чаще всего в пределах от 0,4 до 1%, что также увеличивает трудоемкость переработки [3-5]. Характеристика вмещающих пород, величина глинистой составляющей, крупность и форма золотин, повышенное содержание мелких и тонких фракций, режим работы промывочных агрегатов и ряд других факторов влияют на технологические параметры переработки золотоносных песков, увеличивая капитальные и энергетические затраты.

К интенсифицирующим дезинтеграционные процессы факторам можно отнести прямое ме-

ханическое воздействие на конгломераты песков и гидродинамические эффекты. Особое значение в настоящее время приобретает направление исследований на основе инициирования развитой турбулентности, гидравлических ударов, кавитации в гидросмесях, обеспечивающих микродезинтеграцию твердой составляющей.

Состояние вопроса и постановка проблемы

Поиски решения проблемы микродезинтеграции высокоглинистых песков россыпей осуществлялись на основе использования гравитационных методов динамического типа в тонкослойных потоках на аппаратах и в зумпфовых накопителях, сочетающих элементы вибрационного или волнового излучающего воздействия, на концентрационных столах обычного типа и вращающихся с активизацией процесса обезвреживания продукта [6-8]. Предпринимались попытки использования комбинированного воздействия гравитации и ультразвука при переработке тяжелых минералов из труднопромывистых россыпных месторождений, в частности высокоглинистых, с повышенным содержанием мелкого золота [9, 10].

В настоящее время получает развитие исследование процессов дезинтеграции гидросмесей в устройствах, реализующих эффект Вентури, кавитации и других гидродинамических явлений. Известны разработки, в основе которых лежит активизация гидродинамических эффектов посредством гибких препятствий и отражателей в виде механических резонаторов, формирующих в текучей среде параметрические резонансные колебания. Интересна разработка многоступенчатого гидроударно-кавитационного устройства для мелкодисперсного измельчения в проточном режиме [11]. Однако, в силу определенных условий, в том числе необходимости создания не только мощных энергетических установок, способных обеспечить разрушение минеральных частиц, но и менее энергозатратных, данная разработка не отвечает необходимым требованиям.

Идя по пути развития менее энергозатратных установок, В.П. Терехиным в соавторстве [12] предложено устройство, инициирующее гидродинамические колебания в текучей среде за счет ее движения относительно гибких препятствий, снабженных кавитаторами, установленными на механических резонаторах с образованием пульсирующей кавитационной зоны. Однако низкий КПД, обусловленный геометрической зависимостью условий возбуждения колебаний и невозможностью использования высоких скоростей потока для обработки сред высокой плотности,

ограничивает применение устройства для дезинтеграции минеральных компонентов гидросмесей. Следует отметить, что инициирование кавитации посредством модулирования гидродинамических истечений струй и потоков минеральных гидросмесей с использованием стационарных элементов в настоящее время получает свое развитие.

Известны исследования, связанные с обобщением математических моделей гидродинамических и кавитационных явлений [13], комбинации ультразвука и поверхностно-активных веществ [14], влияния ударных волн и кавитации, возбуждаемых в начальной стадии каналом электрического разряда при воздействии на частицы в водных суспензиях [15]. В работе [16] предложена приближенная модель вихревого потока, инициируемого воздействием газообразного продукта, завихрителей и стержней. Установлено, что энергия вихревого потока пропорциональна расходу потока, разности давлений на входе и выходе устройства. Моделирование гидродинамических процессов фильтрации пластовой жидкости является важным элементом при интерпретации кривых притока и восстановления давления, а также позволяет решать ряд задач, касающихся режима испытания объекта и выбора компоновки испытательного оборудования. Расширяются области применения кавитаторов в лабораторных условиях для получения металлов, оксидов металлов, халькогенидов, карбидов металлов и углерода. Отмечается значительное затруднение дальнейшего применения кавитаторов в промышленных масштабах из-за проблем масштабирования [17-20]. Отмечается также необходимость развития теоретических, вычислительных и экспериментальных методов исследования механизма генерации кавитации, которые еще недостаточно изучены при использовании экспериментальной визуализации потока, изображений частиц. Универсальные методы исследования и проектирования, закон масштабирования и метод оптимизации в данном направлении еще не созданы [21, 22].

Исследования дезинтеграции высокоглинистых песков с повышенным содержанием ценных компонентов мелких и тонких фракций лежат в области происходящих физико-механических, физико-химических и гидродинамических явлений при взаимодействии гидросмеси с рабочими органами путем регулирования истечения потока в соответствии с заданными параметрами. Срабатывают разнообразные эффекты понижения прочности вследствие влияния гидродинамических эффектов, инициирующих по-

нижение удельной свободной поверхностной энергии твердого тела.

Целью исследования является анализ изменения массовой гидродинамической мощности и термодинамического потенциала системы в процессе деструкции минеральной составляющей гидросмеси при подаче потока через сопло в предлагаемой установке, моделирующей гидродинамические эффекты на первой ступени генерации с учетом объемного расхода гидросмеси на основе аналитических расчетов.

Полученные результаты и их обсуждение

Для решения вопроса глубокой переработки труднообогатимых высокоглинистых песков россыпей, с целью эффективного вскрытия измельчаемого материала на уровне дисперсности фракций десятков и менее микрометров более экологически и технологически эффективными средствами, разработана и предлагается система, моделирующая процессы многоступенчатой струйно-акустической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси. Конструктивное выполнение гидродинамического генератора, обеспечивающего деструкцию связей глинистой составляющей минеральных компонентов для интенсификации выделения мелких частиц ценных минералов, включает сопло 1 (рис. 1), диффузор 2, в который посредством сопла осуществляется скоростная подача струи минеральной гидросмеси на плоскую поверхность рассекателя 3 и последующее поступление ее в конфузор 4 с рассекателями в виде балок-уголков 5, расположенных с накло-

ном вдоль стенок конфузора и балок-уголков 6, расположенных в центральной части с противоположным наклоном по отношению к стенкам.

Существующая техническая возможность регулирования параметров скоростных режимов подачи гидросмеси при определенном соотношении твердой фракции к жидкой, расхода гидросмеси и времени деструкции материала делает процесс достаточно управляемым при необходимом преобразовании сырья в сторону разрушения на микроуровне. В расчетах диаметр выходного сечения сопла d принимаем равным 0,03 и 0,05 м, время воздействия t принимаем 2 и 4 с. При содержании твердого 0,1 и воды 0,9 частей расчетная равновесная плотность гидросмеси ρ составит величину 1076,3 кг/м³. Коэффициент полезного действия установки η принимаем равным 0,5. Площадь поверхности турбулизации S_m при радиусе, равном 0,1 м, составит 0,0314 м². Диапазон изменения расхода гидросмеси Q принимаем равным от 0,02 до 0,1 м³/мин или от 0,00033 до 0,00167 м³/с.

Для определения массовой гидродинамической мощности потока W по формуле

$$W = P \cdot S_m \quad (1)$$

определяем давление струи P на плоскую поверхность рассекателя 3 (см. рис. 1) с учетом плотности ρ , объемного расхода гидросмеси Q и скорости потока V , выходящего из сопла при заданных параметрах по формуле

$$P = \rho \cdot Q \cdot V. \quad (2)$$

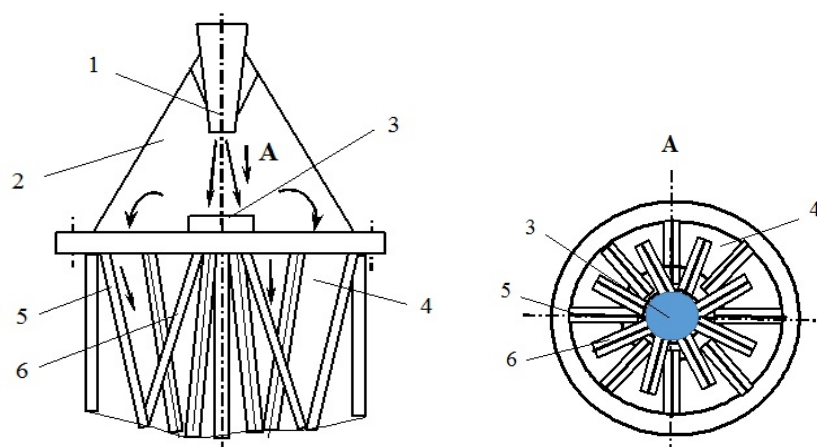


Рис. 1. Схема инициирования гидродинамических возмущений на первой ступени генератора: 1 – сопло; 2 – диффузор; 3 – плоская поверхность рассекателя; 4 – конфузор с рассекателями в виде балок-уголков; 5 – удлиненные балки-уголки; 6 – короткие балки-уголки

Fig. 1. Diagram of initiation of hydrodynamic disturbances at the first stage of the generator: 1 is a nozzle; 2 is a diffuser; 3 is a flat surface of the divider; 4 is a convergent tube with angle beam-shaped dividers; 5 are long angle beams; 6 are short angle beams

На рис. 2 представлена зависимость массовой гидродинамической мощности системы W от расхода гидросмеси Q , полученная с учетом теоретической формулы (1).

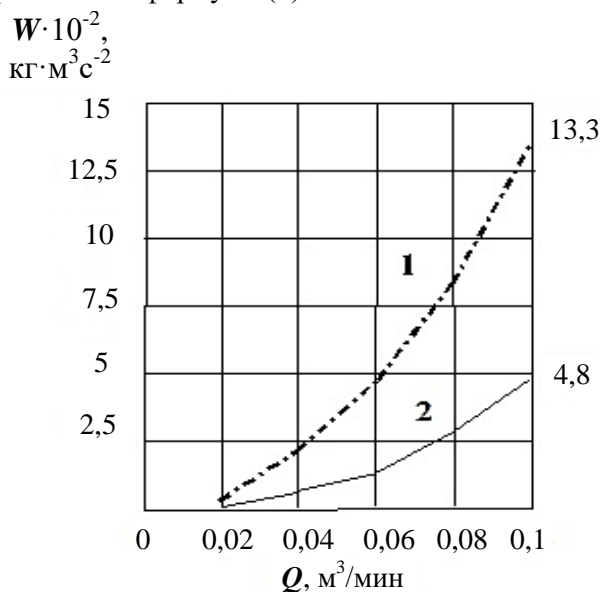


Рис. 2. Зависимость изменения массовой гидродинамической мощности системы от расхода гидросмеси при времени 2 с и диаметрах выходного сечения сопла, равных 0,03 м (1) и 0,05 м (2)

Fig. 2. Dependence between changes in mass hydrodynamic power of the system and the flow rate of slurries at a period of 2 s and nozzle exit section diameters of 0,03 m (1) and 0,05 m (2)

Расчет изменения термодинамического потенциала E системы осуществляем по формуле

$$dE = W \cdot n \cdot dt. \quad (3)$$

На рис. 3 представлена зависимость изменения термодинамического потенциала E поверхностей минеральных частиц гидросмеси от расхода гидросмеси Q , полученная с учетом теоретической формулы (3).

В результате расчетов установлено, что определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц на первой ступени турбулизации играет изменение массовой гидродинамической мощности системы, зависящей от плотности ρ , объемного расхода гидросмеси Q и скорости потока V гидросмеси, выходящего из сопла при заданных параметрах, а также изменение термодинамического потенциала системы, зависящего от изменения массовой гидродинамической мощности системы, коэффициента полезного действия установки и времени воздействия.

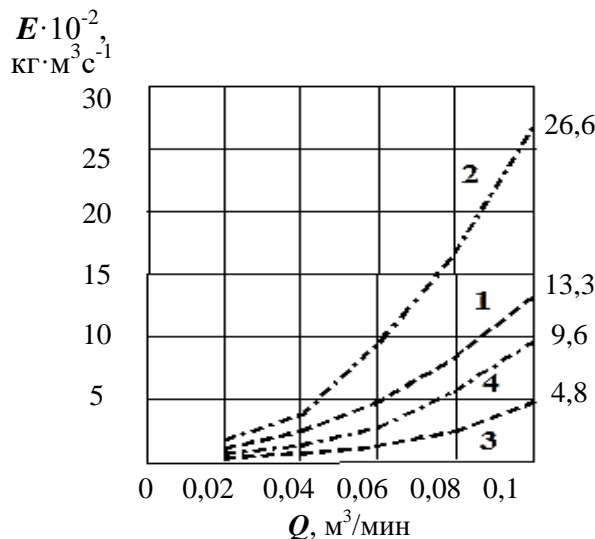


Рис. 3. Зависимость изменения термодинамического потенциала поверхностей минеральных частиц от расхода гидросмеси: 1 – при диаметре выходного сечения сопла $d = 0,03$ м и времени 2 с; 2 – при $d=0,03$ м и времени 4 с; 3 – при $d=0,05$ м и времени 2 с; 4 – при $d = 0,05$ м и времени 4 с

Fig. 3. Dependence between changes in thermodynamic potential of the surfaces of mineral particles and the flow rate of slurries: 1 is when nozzle exit section diameter $d = 0,03$ m and time is 2 s; 2 is at $d = 0,03$ m and 4 s; 3 is at $d = 0,05$ m and 2 s; 4 is at $d = 0,05$ m and 4 s

При увеличении расхода и скорости потока в 5 раз давление, массовая гидродинамическая мощность и термодинамический потенциал системы увеличиваются в среднем в 25,6-25,7 раза. При уменьшении выходного диаметра сопла, согласно расчетным данным, массовая гидродинамическая мощность и термодинамический потенциал системы увеличивается в среднем в 2,8 раза (см. рис. 2). Расход гидросмеси и диаметр сопла влияют на скоростной режим струи, который, в свою очередь, активизирует давление на плоскую поверхность рассекателя, формируя массовую гидродинамическую мощность, оказывающую влияние на изменение термодинамического потенциала системы минеральных частиц.

Предлагаемая конструкция установки

Гидродинамический генератор выполнен с профилированными сужающимися и расширяющимися каналами, образующими корпус генератора, а также с последовательно установленными стационарными кавитационными элементами в виде балок-уголков [23]. Профилированные сужающиеся и расширяющиеся каналы корпуса генератора выполнены составными для

удобства технологической сборки и разборки (рис. 4). Дезинтеграция полиминеральной составляющей гидросмеси до микроуровня обеспечивается посредством преобразования кинетической энергии потока жидкости в энергию акустических колебаний и усиливается путем формирования полей в зоне кавитации в нижней части конфузора. На выходе из верхнего диффузора создают турбулентность, переходящую в разреженность посредством жестко вплотную закрепленных вдоль стенки конфузора по всей высоте удлинненных балок-уголков.

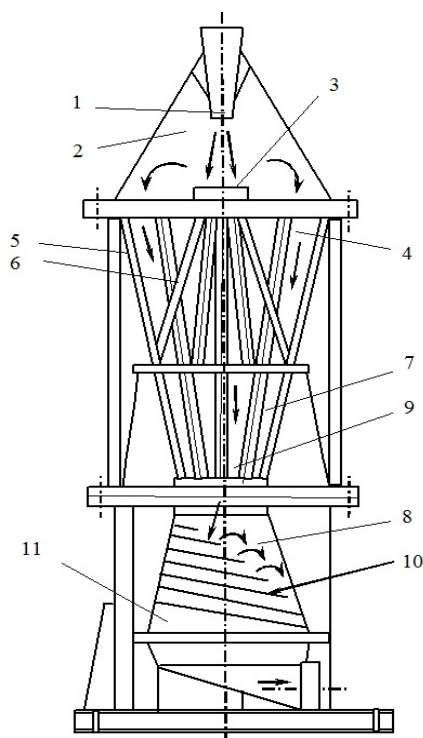


Рис. 4. Гидродинамический генератор: 1 – сопло; 2 – верхний диффузор; 3 – плоская поверхность раскателя; 4 – конфузор; 5 – удлинненные балки-уголки; 6 – короткие балки-уголки; 7 – сужающийся канал; 8 – расширяющийся канал; 9 – нижняя часть конфузора; 10 – ребра; 11 – нижний диффузор

Fig. 4. Hydrodynamic generator: 1 is a nozzle; 2 is a top diffuser; 3 is a flat surface of the divider; 4 is a convergent tube; 5 are long angle beams; 6 are short angle beams; 7 is a tapering channel; 8 is an expanding channel; 9 is a bottom part of the convergent tube; 10 are ribs; 11 is a bottom diffuser

Интенсификация процесса усиливается посредством коротких балок-уголков, установленных в сегментах между удлинненными балками-уголками с противоположным наклоном по вертикали по отношению к ним. Кромки прямого

угла коротких балок-уголков повернуты навстречу потоку для усиливающего эффекта. Последующий турбулентный режим осуществляется с помощью ребер, установленных с наклоном в нижней части корпуса – нижнем диффузоре гидродинамического генератора (см. рис. 4). С учетом влияния массовой гидродинамической мощности и формируемого термодинамического потенциала системы минеральная составляющая гидросмеси претерпевает изменения в сторону активного разрушения структурных и физико-механических связей. В зависимости от типа структурных связей изменяются морфометрические и энергетические параметры системы. Данный эффект преобразования может использоваться в обогащительных процессах, активизируя физико-химическое влияние реагентов и обеспечивая снижение их расхода.

Заключение

Аналитическим путем определены основные факторы, влияющие на кинетику и способствующие интенсификации процесса деструкции минеральной составляющей гидросмеси при подаче потока через сопло в установках, моделирующих гидродинамические эффекты на первой ступени генерации с учетом объемного расхода. Осуществлен анализ изменения массовой гидродинамической мощности и термодинамического потенциала системы в процессе деструкции твердой составляющей гидросмеси. Прогнозируемые процессы в установке без дополнительных энергетических затрат позволят обеспечить получение необходимых значений объемной плотности гидродинамических возмущений для обеспечения градиента давления с превышением предела прочности микрочастиц высокоглинистых золотоносных песков россыпей.

Развитие численных методов исследования и проектирования гравитационных установок позволит адаптировать их к использованию на объектах добычи полезных ископаемых, обеспечит сокращение потерь тонких частиц ценных компонентов, снизит потребление энергоресурсов и повысит экологическую безопасность. Применение данного эффекта преобразования непосредственно в обогащительных процессах с использованием реагентов будет способствовать активизации физико-химического влияния реагентов, обеспечивая снижение их расхода. Исследования в данном направлении требуют своего дальнейшего развития.

Список источников

1. Мамаев Ю.А., Хрунина Н.П. Перспективы освоения глинистых россыпей Приамурья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 55. С. 47-57.
2. Семенов А.Н., Серый Р.С. Исследование процессов дезинтеграции труднопромывистых песков россыпных месторождений золота // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 8. С. 88-96. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-88-96.
3. 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.
4. Шкаруба Н.А., Кисляков В.Е., Борисов Ф.И. Особенности обоснования параметров моделирования размыва горных пород напорной струей гидромонитора // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25, № 4. С. 32-38.
5. Мирзаханов Г.С., Литвинцев В.С., Алексеев В.С. Перспективы масштабного освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов // Маркшейдерия и недропользование. 2019. № 6. С. 22-30.
6. Пат. РФ № 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. Оpubл. 20.08.2002. Бюл. № 23.
7. Хрунина Н.П., Чебан А.Ю. Оценка влияния водонасыщения на дезинтеграцию высокоглинистых песков при разработке россыпей благородных металлов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 4 (52). С. 50-55.
8. 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.
9. Пат. 2209974 РФ. Геотехнологический комплекс с многоступенчатой дезинтеграцией / Н.П. Хрунина, Ю.А. Мамаев; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Оpubл. 10.08.2003. Бюл. № 22.
10. Пат. 2200629 РФ. Грохот-дезинтегратор с интенсификацией кавитации комбинированным воздействием ультразвука / Н.П. Хрунина; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Оpubл. 20.03.2003. Бюл. № 8.
11. Пат. на полезную модель 115690 РФ. Многоступенчатое гидроударно-кавитационное устройство / А.Н. Анушенков, И.В. Мещеряков. Оpubл. 10.05.2012. Бюл. № 13.
12. 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. Оpubл. 27.02.2013. Бюл. № 6.
13. Математическое моделирование кавитационных процессов при кондиционировании промышленных сточных вод / Дубровская О.Г., Кулагина В.А., Сапожникова Е.С., Фэнг-Чэнь Лив, Цянь Лив, Чжи-Ин Чжэн // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2015. № 8. С. 369-376.
14. Замотин П.А., Лобанов В.Г. Интенсификация процесса измельчения золотосодержащей руды с использованием поверхностно-активных веществ и дополнительной обработкой ультразвуком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 25-32. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-25-32.
15. Кудимов Ю.Н., Казуб В.Т., Голов Е.В. Электро-разрядные процессы в жидкости и кинетика экстрагирования биологически активных компонентов. Ч. 1. Ударные волны и кавитация // Вестник ТГТУ. 2002. Т. 8. № 2. С. 254-264. ISSN 0136-5835.
16. Аникин В.С., Аникин В.В. Моделирование гидродинамических вихревых потоков с ультразвуковыми кавитационными процессами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2008. № 24. С. 61-66.
17. Atici U., Comakli R. Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient by // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2019. Vol. 119. Pp. 63-69.
18. Choi J., Cui M., Lee Y., Ma J., Kim J., Son Y., et al. Hybrid reactor based on hydrodynamic cavitation, ozonation and oxidation of persulfate for the decomposition of oxalic acid in the processes of extraction of rare earth elements // Ultrasound. Sonochem. 2019. 52, 326-335. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.12.004.
19. Gagol M., Przyjazny A., Boczkaj G. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – a review // Chem. Eng. J. 2018. Vol. 338, 599-627. DOI: 10.1016/j.cej.2018.01.049
20. Gagol M.R., Soltani D.C., Przyjazny A., Boczkaj G. Effective degradation of sulfide ions and organic sulfides in cavitation-based advanced oxidation processes (AOPs) // Ultrason. Sonochem. 2019. 58:104610. DOI: 10.1016/j.ultsonch. 2019.05.027.
21. Kim H., Koo B., Sun X., Yong Yoon J. Investigation of the process of sludge disintegration using a hydrodynamic cavitation reactor of rotary-stator type // Sep. Purif. Technol. 2020. 240:116636. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116636.
22. Маркон А., Мелкот С.Н., Йода М. Влияние масштабирования размера сопла при кавитационном струйном упрочнении воды // J. Manuf. Процесс. 2018. № 31. С. 372-381.
23. Пат. 2714417 РФ. Способ активации микродезинтеграции высокоглинистой полиминеральной составляющей гидросмеси / Н.П. Хрунина; заявитель и патентообладатель ИГД ДВО РАН. Оpubл. 14.02.2020. Бюл. № 5.

References

- 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, no. S5, pp. 47-57. (In Russ.)
- Semenov A.N., Sery R.S. Study on disintegration processes of hard-to-wash sands of placer gold deposits. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [News of Higher Institutions. Mining Journal], 2019, no. 8, pp. 88-96. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-8-88-96. (In Russ.)
- Mirzekhanov G.S., Litvintsev V.S. The state and problems of development of technology-related placer deposits of noble metals in the Far Eastern region. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2018, no. 10, pp. 25-30. (In Russ.)
- Shkaruba N.A., Kislyakov V.E., Borisov F.I. Features of providing rationale for parameters of modeling the erosion of rocks by a pressure jet of a hydraulic monitor. *Vestnik Zabaikalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Transbaikal State University], 2019, vol. 25, no. 4, pp. 32-38. (In Russ.)
- Mirzekhanov G.S., Litvintsev V.S., Alekseev V.S. Prospects for large-scale development of technology-related placer deposits of noble metals. *Marksheideriya i nedropolzovanie* [Surveying and Subsoil Use], 2019, no. 6, pp. 22-30. (In Russ.)
- Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Stratechuk O.V., Khrunin T.O. *Mnogourovnevaya ustanovka dlya izvlecheniya tsennykh mineralov* [A multi-level unit for the extraction of valuable minerals]. Patent RU, no. 2187373, 2002.
- Khrunina N.P., Cheban A.Yu. Assessment of the influence of water saturation on the disintegration of high-clay sands in the development of placers of noble metals. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 4 (52), pp. 50-55. (In Russ.)
- Mamaev Yu.A., Khrunina N.P. Determination of optimal initial parameters of sound effect on the pulp in a sump in the open development of high-clay placers. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2009, no. 7, pp. 187-191. (In Russ.)
- Khrunina N.P., Mamaev Yu.A. *Geotekhnologicheskiy kompleks s mnogostupenchatoy dezintegratsiei* [Geotechnological complex with multi-stage disintegration]. Patent RU, no. 2209974, 2003.
- Khrunina N.P. *Grokhot-dezintegrator s intensifikatsiei kavitatsii kombinirovannym vozdeystviem ultrazvuka* [A sizing disintegrator with intensification of cavitation by combined exposure to ultrasound]. Patent RU, no. 2200629, 2003.
- Anushenkov A.N., Meshcheryakov I.V. *Mnogostupenchatoe gidroudarno-kavitatsionnoe ustroystvo* [A multistage water hammer-cavitation device]. Utility model patent RU, no. 115690, 2012.
- Terekhin V.P., Pastukhov D.M., Pastukhov M.E. *Sposob vozbuzhdeniya akusticheskikh kolebanii v tekuchej srede i ustroystvo (varianty) dlya ego osushchestvleniya* [Method of excitation of acoustic vibrations in fluid and device(s) for its implementation]. Patent RU, no. 2476261, 2013. (In Russ.)
- Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Sapozhnikova E.S., Feng-Chen Li, Qian Li, Zhi-Ying Zheng. Mathematical modeling of cavitation processes in conditioning industrial wastewater. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies], 2015, no. 8, pp. 369-376. (In Russ.)
- Zamotin P.A., Lobanov V.G. Intensification of the process of grinding gold-containing ore using surfactants and additional sonication. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 25-32. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-25-32
- Kudimov Yu.N., Kazub V.T., Golov E.V. Electric discharge processes in liquid and kinetics of extraction of biologically active components. Part 1. Shock waves and cavitation. *Vestnik TGTU* [Bulletin of Tambov State Technical University], 2002, vol. 8, no. 2, pp. 254-264. ISSN 0136-5835. (In Russ.)
- Anikin V.S., Anikin V.V. Modeling of hydrodynamic vortex flows with ultrasonic cavitation processes. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radio-tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University], 2008, no. 24, pp. 61-66. (In Russ.)
- Atici U., Comakli R. Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119, 63-69 (2019).
- Choi J., Cui M., Lee Y., Ma J., Kim J., Son Y. et al. Hybrid reactor based on hydrodynamic cavitation, ozonation and oxidation of persulfate for the decomposition of oxalic acid in the processes of extraction of rare earth elements. *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 326-335 (2019). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.12.004.
- Gagol M., Przyjazny A., Boczkaj G. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – a review. *Chem. Eng. J.* 338, 599-627 (2018). DOI: 10.1016/j.cej.2018.01.049
- Gagol M.R., Soltani D.C., Przyjazny A., Boczkaj G. Effective degradation of sulfide ions and organic sulfides in cavitation-based advanced oxidation processes (AOPs). *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104610 (2019). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.05.027.
- Kim H., Koo B., Sun X., Yong Yoon J. Investigation of the process of sludge disintegration using a hydrodynamic cavitation reactor of rotary-stator type. *Sep. Purif. Technol.* 240, 116636 (2020). DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116636.

22. Marcon A., Melkote S.N., Yoda M. Effect of nozzle size scaling in co-flow water cavitation jet peening. J. Manuf. Process, 2018, no. 31, pp. 372-381.
23. Khrunina N.P. *Sposob aktivatsii mikrodezintegratsii vysokoglinistoy polimineralnoy sostavlyayushchey gidrosmesi* [Method of activation of microdisintegration of a high-clay polymineral component of slurry]. Patent RU, no. 2714417. 2020.

Поступила 12.05.2022; принята к публикации 01.09.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 12/05/2022; revised 01/09/2022; published 26/09/2022

Хрунина Наталья Петровна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
Хабаровский Федеральный исследовательский центр, Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия.
E-mail: npetx@mail.ru. ORCID 0000-0001-8117-0922

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