



Научная статья

УДК 622.271.1:622.236.52

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-294-304>

Влияние гидродинамических эффектов на структурные изменения дисперсоида в процессе микродезинтеграции

Наталья Петровна Хрунина^а^аИнститут горного дела ДВО РАН – обособленное подразделение Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

Резюме. Цель представленного исследования заключалась в теоретическом обосновании процесса образования дисперсоида высокоглинистых песков россыпей с повышенным содержанием мелкого и тонкодисперсного золота в условиях изменения гидродинамических параметров потока гидросмеси посредством ограждающих и отражающих поверхностей предлагаемой установки. Объектом исследований являлся процесс гидродинамической дезинтеграции. Предмет исследования включал основные параметры гидродинамического воздействия на минеральную среду и характер разрушения высокоглинистых песков в гидродинамических условиях. В ходе работы автором были использованы методы построения математической модели преобразования дисперсоида при гидродинамическом воздействии на гидросмесь, аналитические и численные расчеты. Анализ аспектов гидродинамических явлений и взаимодействий позволил обосновать процесс образования дисперсоида на основе интенсификации микродезинтеграции и выявить характерные факторы влияния. На основе теории изменения термодинамического потенциала системы поверхностей частиц при динамическом воздействии предложен метод определения гидродинамических параметров изменения структурной составляющей гидросмеси в закрытой полости генератора при взаимодействии с элементами ограждающих и отражающих поверхностей. На основе численных расчетов установлено существенное увеличение удельной межфазной поверхности дисперсоида минеральной составляющей. В результате взаимодействия с элементами ограждающих и отражающих поверхностей в предлагаемой инновационной схеме расположения элементов в генераторе при направленной подаче гидросмеси из сопла в закрытую полость увеличение составило от 3 до 4 раз. Предложена новая конструкция гидродинамического генератора и технологическая схема для обеспечения активизации процесса извлечения микрочастиц ценных компонентов.

Ключевые слова: высокоглинистые пески, гидродинамические явления, микродезинтеграция, термодинамический потенциал, гидродинамический генератор, кавитационный реактор

Финансирование: 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 Российской Федерации по проекту № 075-15-2021-663.

Для цитирования: Хрунина Н. П. Влияние гидродинамических эффектов на структурные изменения дисперсоида в процессе микродезинтеграции // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 3. С. 294–304. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-294-304>.

Original article

Influence of hydrodynamic effects on dispersoid structural changes under microdisintegration

Natalia P. Khrunina^а^аMining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences – an autonomous subdivision of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract. The purpose of the presented study is to give a theoretical substantiation of the formation process of a high-clay sand dispersoid from placers with a high content of fine and finely dispersed gold under changing hydrodynamic parameters of the hydro mixture flow by means of enclosing and reflecting surfaces of the proposed installation. The object of the research is the process of hydrodynamic disintegration. The subject of the study includes the main parameters of the hydrodynamic effect on the mineral environment and the destruction nature of high-clay sands under hydrodynamic

© Хрунина Н. П., 2022



conditions. While doing the research, the author used the methods for constructing a mathematical model of dispersoid transformation under hydrodynamic effect on the hydro mixture, analytical and numerical calculations. The analysis of the aspects of hydrodynamic phenomena and interactions made it possible to substantiate the dispersoid formation process based on the intensification of microdisintegration and to identify the characteristic impact factors as well. Based on the theory of changes in the thermodynamic potential of the system of particle surfaces under dynamic exposure, a method has been proposed for determining the hydrodynamic variation parameters of the hydromixture structural component in the closed cavity of the generator when interacting with the elements of the enclosing and reflecting surfaces. The performed numerical calculations allowed to reveal a significant increase in the specific interphase surface of the dispersoid of the mineral component. The interaction of the elements of enclosing and reflecting surfaces according to the proposed innovative layout of elements location in the generator under the directed supply of the hydromixture from the nozzle into a closed cavity resulted in the increase from 3 to 4 times. A new design of a hydrodynamic generator and a flow diagram have been introduced on order to activate the extraction process of microparticles of valuable components.

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

Funding: The research was carried out using the facilities of the Research Equipment Sharing Center "Scientific Data Processing and Storage Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences" funded by the Russian Federation through the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project no. 075-15-2021-663.

For citation: Khrunina N. P. Influence of hydrodynamic effects on dispersoid structural changes under microdisintegration. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2022;45(3):294-304. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2022-45-3-294-304>.

Введение

Особую часть аллювиальных природных и техногенных полиминеральных месторождений юга Дальневосточного региона России составляют глинистые и высокоглинистые россыпи с преобладанием тонкодисперсных и наноразмерных частиц ценных компонентов, потери которых в процессе эксплуатации достигают значительной величины [1]. В последнее время усиленное внимание уделяется экологическим аспектам защиты окружающей среды. Анализ работы шлюзов, барабанных дезинтеграторов и гидравлических центробежных дезинтеграторов, которые являются наиболее известными новейшими и испытанными в производственных условиях конструкциями, показывает, что данные установки предназначены для предварительной дезинтеграции глинистых песков и применение их на объектах с преимущественно тонкодисперсными частицами ценных компонентов не обеспечит существенного снижения потерь [2–8]. Интересны подходы к анализу перспектив развития акустической и гидродинамической кавитации исследователей из Японии и Китая. Отмечается использование акустического кавитатора в лабораторных условиях для получения металлов, оксидов металлов, халькогенидов, карбидов металлов и углерода. Дальнейшее применение в промышленных масштабах кавитаторов значительно

затруднено из-за проблем масштабирования [9–12]. 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 [13]. Развиваются нетрадиционные высокоэнергетические методы исследования дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов на основе излучающих систем, в том числе ультразвуковых [14–17]. Тем не менее данные технологии в сильной степени энергозатратны и пока не находят широкого применения в производстве.

Недостаточное качество процесса дезинтеграции высокоглинистых песков россыпей, существенные потери ценных компонентов, обусловленные не только отклонениями технологических режимов от оптимальных значений, но и несовершенством конструкций машин, высокая энергоемкость применяемого технологического оборудования снижают эффективность переработки золотосодержащих песков. Дифференцирование определенным образом процесса дезинтеграции на переработку крупных и мелких фракций позволит



обеспечить процесс микродезинтеграции и снизить потери тонких и мелких частиц ценных компонентов. Для обеспечения динамической устойчивости и улучшения качества процесса гидродинамические генераторы оснащают элементами кавитации. Конфигурация элементов, их расположение и форма достаточно разнообразны.

Материалы и методы исследования

Одной из фундаментальных задач процессов разрушения в жидких средах является выяснение природы возникновения и распространения волн, взаимодействующих с твердой минеральной составляющей пульпы. Процессы преобразования энергии посредством трансформации поступательных форм движения потоков гидросмеси в отражательные или колебательные от разных типов поверхностей могут вызывать существенное усиление разрушающего типа.

Понимание сложных механизмов взаимодействия волн и потоков, динамики их распространения и производимых гидродинамических эффектов может позволить управлять этими процессами. Рассмотрено равновесие действующих на частицу сил при гравитационном разделении твердого в гидросмесях, которое выражается зависимостью

$$Vp_h g - Vg \left[(1 - m) \int_{p_1}^{p_2} y dp_h + mp_{sr} \right] - VK \frac{1}{y(p_h)} \text{grad}y(p_h) - av = 0, \quad (1)$$

где V – объем частицы; p_h – плотность частицы; g – вектор ускорения силы тяжести; m – содержание среды (воды) в единице объема взвеси; $\int_{p_1}^{p_2} y dp_h$ – доля фракции в диапазоне изменения плотности от p_1 до p_2 ; y – функция распределения частиц по плотности; p_{sr} – средняя плотность среды; K, a – коэффициенты; v – вектор средней скорости частицы.

Для обоснования процессов дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси в условиях резонансных акустических явлений в гидротоке и определения технологических и конструктивных параметров систем, моделирующих кавитационные и гидродинамические эффекты, из всего многообразия подходов к решению поставленной задачи необходимо выявить факторы, влияющие на

характер протекания процесса [18–20]. Гидросмесь при дезинтеграции представляет собой жидкость с твердыми включениями. Известно, что прочность жидкости резко снижается при содержании в ней твердых частиц или газовых включений.

В ходе рассмотрения процесса подачи минеральной гидросмеси на ограждающую поверхность, касательная которой образует угол с осью струи, давление струи определяется по формуле

$$P = \frac{\gamma}{g} Qv(1 + \cos \beta) = pQv(1 + \cos \beta) = pQv(1 + (-0,5)) = 0,5pQv, \quad (2)$$

где γ – объемный вес жидкости; g – ускорение свободного падения; Q – расход жидкости; v – скорость струи жидкости; β – угол между касательной к ограждающей поверхности и осью струи; p – плотность гидросмеси.

Для усиления давления струи ограждающая поверхность должна быть плоской, тогда зависимость (2) преобразуется следующим образом:

$$P = \frac{\gamma}{g} Qv = pQv. \quad (3)$$

Давление в таком случае увеличивается вдвое для активизации разрушающего эффекта твердой составляющей гидросмеси. Теоретические выводы по гравитационному разрушению минеральной составляющей гидросмеси дают общие представления о возникающих процессах в многокомпонентных средах при гидродинамических воздействиях, инициируемых различными источниками физического и механического влияния.

Задача теоретического изучения процесса дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси в условиях резонансных акустических явлений в гидротоке и определения технологических и конструктивных параметров систем состоит в выявлении зависимостей с целью прогнозирования поведения и управления процессом для достижения практически важных условий осуществления способа в реальных условиях. Решение задачи существенно облегчается, если вместо самих процессов предварительно изучить их модели. Математические модели вследствие их относительной простоты помогают понять процесс, дают возможность установить характеристики, на основе которых можно пред-



определить необходимые структурные изменения изучаемой системы. Это позволяет в сложных случаях, связанных с затратами на проектирование и изготовление опытных образцов, без проведения натуральных экспериментальных исследований оценить идейный замысел.

В связи с вышеизложенным цель представленного исследования состояла в том, чтобы на основе анализа аспектов гидродинамических явлений и взаимодействий посредством численных расчетов обосновать процесс образования дисперсоида высокоглинистых песков с повышенным содержанием мелкого и тонкодисперсного золота в условиях изменения гидродинамических параметров потока гидросмесей посредством ограждающих и отражающих поверхностей.

Результаты исследования и их обсуждение

Метод решения и численные расчеты.

Известно, что любая математическая модель должна удовлетворять требованию адекватности процесса, отражать наиболее существенные связи между величинами, характеризующими процесс, учитывать свойства среды, в которой происходит процесс, и информацию о начальном состоянии процесса. Модель должна быть также по возможности не слишком сложной, иметь аналитические или численные решения. Рассматривая гидродинамические явления в установках дезинтеграции закрытого типа при подаче пульпы через сопло, с учетом уравнения (3) необходимо получить данные о формируемом давлении P на ограждающую поверхность:

$$dP = pQdv. \quad (4)$$

Данное давление будет зависеть от равновесной плотности гидросмеси ρ , объемного расхода гидросмеси Q и скорости потока струи v , падающего на ограждающую поверхность при условии, что поверхность направлена перпендикулярно струе и имеет плоскую форму. Равновесная плотность гидросмеси ρ зависит от объемного содержания в водонасыщенных песках воды a_v и минеральной составляющей a_m :

$$\rho = a_v \cdot \rho_v + a_m \cdot \rho_m,$$

где ρ_v – плотность воды; ρ_m – плотность мине-

ральной составляющей при равновесном значении давления соответственно.

Расход гидросмеси задается, а скорость потока струи вычисляется по формуле

$$v = 4Q/\pi \cdot d^2, \quad (5)$$

где d – диаметр выходного сечения сопла.

Мощность струи W будет зависеть от гидродинамического давления P струи минеральной гидросмеси на площадь поверхности S_m , препятствующей потоку:

$$dW = S_m dP. \quad (6)$$

Физико-химические и структурные изменения нарастают по мере увеличения длительности измельчения и определяются величиной подводимой энергии. Изменение термодинамического потенциала системы поверхностей частиц dE при динамическом воздействии будет зависеть от мощности струи W , коэффициента полезного действия и конструктивных особенностей установки n , а также времени воздействия подводимой энергии t :

$$dE = nWdt. \quad (7)$$

Количественная составляющая массы частиц неизменна, и интересующий нас процесс направлен на разделение частиц с увеличением площади поверхностной массы частиц дисперсоида. Основываясь на теории первого и второго начал термодинамики, в которые входят основные виды энергии, с учетом уравнения Гиббса для гетерогенной системы получим зависимость изменения термодинамического потенциала системы поверхностей частиц при динамическом воздействии:

$$dE = edS \text{ или } dS = dEe^{-1}, \quad (8)$$

где e – удельная поверхностная энергия частиц; S – площадь межфазной поверхности частиц дисперсоида.

Подставляя выражение (7) в формулу (8), получим

$$dS = nWe^{-1}dt. \quad (9)$$

Получаем выражение для процесса преобразования твердой составляющей в гидросмеси:

$$\int_{S_0}^{S_u} \frac{dS}{S} = nWe^{-1} \int_0^t dt. \quad (10)$$

Производя интегрирование, получаем зависимость для определения удельной межфазной поверхности системы частиц в выбранном размерном диапазоне измерения S_u , м², для расчета в численном выражении:



$$S_u = S_0 \exp(Ee^{-1}), \quad (11)$$

где S_0 – исходная удельная межфазная поверхность системы частиц в выбранном размерном диапазоне измерения при $t = 0$.

Полученные зависимости можно применять для численных расчетов разработанной и защищенной патентом установки.

Численные результаты расчетов. Расчеты проведены по формулам (4)–(11) для предварительной оценки гидродинамического влияния потока на процесс разрушения минеральной составляющей гидросмеси при взаимодействии гидросмеси с отражательной плоской поверхностью 1, элементами поверхностей 4 и 5 установки гидродинамического генератора, разработанного автором статьи (рис. 1). Процесс осуществляется путем подачи гидросмеси из сопла 2 диффузора 3, отражения части потока от гидродинамического распределителя с перфорированными поверхностями 4, установленными выше и под углом к поверхности 1. В расчет включен также процесс попадания потока на верхнюю часть ребер вертикальных пластинчатых кавитационных элементов 5.

При проведении расчетов учитывались прочностные качества конструкции, все элементы выполнены из прочных материалов и закреплены жестко для исключения колебаний. Время воздействия потока на элементы принимаем равным 2 с. При содержании частей твердого 0,1 и воды 0,9 в гидросмеси рас-

четная равновесная плотность гидросмеси составляет величину $1076,3 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент полезного действия установки η принимаем равным 0,5. Удельная поверхностная энергия частиц σ равна $780 \cdot 10^{-7} \text{ Дж/см}^2$. Исходную удельную межфазную поверхность минеральных частиц $S_{0уд}$ при взаимодействии с первой ступенью принимаем равной $1,345 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$. При взаимодействии с остальными элементами величины исходных удельных поверхностей рассчитываются в результате преобразования твердого в гидросмеси. Диаметр выходного сечения сопла d принимаем равным 0,05 м. Диапазон изменения объемного расхода гидросмеси Q – от 0,02 до 0,1 $\text{м}^3/\text{мин}$. Площадь отражательной плоской поверхности турбулизации S_m (см. рис. 1, 1) при радиусе, равном 0,1 м, составит 0,0314 м^2 . Принято также, что величина объемного расхода гидросмеси Q после взаимодействия с первым элементом разделяется пополам, то есть на второй элемент направляется половина отраженного потока, а вторая половина направляется на третий элемент. При этом первая половина после взаимодействия со вторым элементом направляется к третьему элементу.

Результаты расчета изменения удельной межфазной поверхности системы частиц при преобразовании потока гидросмеси с учетом последовательного взаимодействия с элементами отражения струй представлены в таблице.

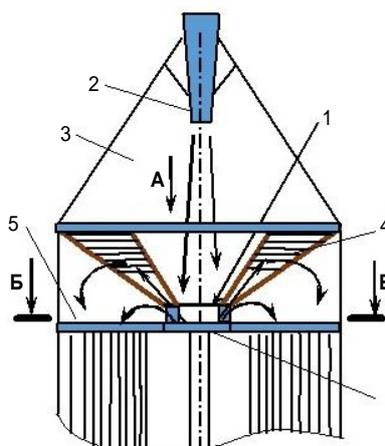


Рис. 1. Принципиальная схема инициирования гидродинамических эффектов на первой ступени генератора:

1 – отражательная плоская поверхность; 2 – сопло; 3 – диффузор; 4 – перфорированные поверхности; 5 – ребра вертикальных пластинчатых кавитационных элементов

Fig. 1. Schematic diagram of hydrodynamic effect initiation at the generator first stage:

1 – reflecting flat surface; 2 – nozzle; 3 – diffuser; 4 – perforated surfaces; 5 – ribs of vertical plate cavitation elements



Результаты расчетов изменения удельной межфазной поверхности частиц при последовательном взаимодействии с элементами отражения струй
Calculation results of changes in the specific interphase surface of particles under sequential interaction with jet reflection elements

Q, м ³ /мин	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
$S_{u1} \cdot 10^5, \text{ м}^{-1}$	1,385	1,479	1,668	1,896	2,46
$S_{u2} \cdot 10^5, \text{ м}^{-1}$	0,70177	0,78017	0,94325	1,1784	1,7345
$S_{0u3} \cdot 10^5, \text{ м}^{-1}$	1,3942	1,5197	1,777	2,1264	2,964
$S_{u3} \cdot 10^5, \text{ м}^{-1}$	1,433	1,702	2,296	3,349	6,064
$S_{u4} \cdot 10^5, \text{ м}^{-1}$	1,423	1,656	2,155	2,986	5,033

В ней приняты следующие обозначения: S_{u1} – величина удельной межфазной поверхности частиц после последовательного взаимодействия с первым элементом, S_{u2} – со вторым элементом, S_{u3} – с третьим элементом; S_{u4} – результирующая величина удельной поверхности частиц при прохождении без второго элемента; S_{0u3} – полученная после преобразования при прохождении через два элемента начальная расчетная величина исходной удельной поверхности частиц для расчета третьего элемента.

На рис. 2 представлена зависимость параметра удельной межфазной поверхности частиц при последовательном взаимодействии с тремя и двумя элементами отражения струй от объемного расхода гидросмеси. Все обозначения на рис. 2 соответствуют таблице и пояснению к ней.

В результате расчетов установлено, что определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц на трех ступенях взаимодействия играет изменение 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. По мере увеличения объемного расхода и скорости потока удельная межфазная поверхность частиц после взаимодействия с первым элементом – отражательной плоской поверхностью – возрастает в 1,6 раза. При максимальном расходе гидросмеси после взаимодействия с двумя элементами – первым и вторым – рост удельной поверхности частиц увеличивается в 3 раза, а после взаимодействия со всеми тремя элементами – в 4 раза. Расчет показал, что при взаимодействии потока гидросмеси с первым и третьим элементами без взаимодействия со вторым элементом рост удельной поверхности увеличивается в 3,5 раза, то есть уменьшается на 16 % по сравнению с увеличением при прохождении через все три элемента.

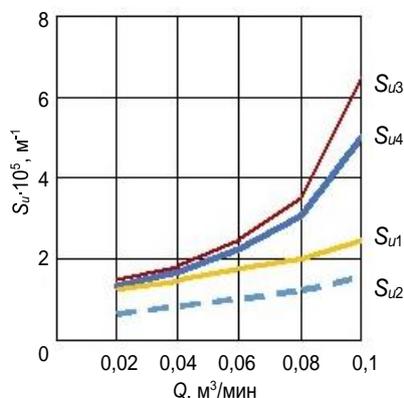


Рис. 2. Зависимость параметра удельной межфазной поверхности частиц от объемного расхода гидросмеси при последовательном взаимодействии с тремя и двумя элементами отражения струй
Fig. 2. Specific interphase particle surface parameter vs volumetric flow rate of the hydromixture under sequential interaction with three and two elements of jet reflection



Рекомендации для практического применения. В соответствии с результатами численного исследования была смоделирована основная часть конструкции гидродинамической установки для микродезинтеграции высокоглинистых песков россыпей с повышенным содержанием мелкого и тонкодисперсного золота (патент РФ № 2646270 от 2 марта 2018 г.)¹ (см. рис. 1). Доработанная конструкция гидродинамического генератора включает в нижней части конфуззор и кавитационные порошки, которые будут обеспечивать дополнительную физико-механическую трансформацию минеральной глинистой составляющей гидросмеси (рис. 3).

Гидродинамические генераторы могут встраиваться в схему переработки после размыва песков и классификации (рис. 4). Гидросмесь с размером минеральных частиц на входе в генератор -5 мм после гидродинами-

ческих воздействий более эффективно пройдет стадию разделения на концентрационных столах с получением концентрата и хвостов (см. рис. 4). Выделенные на концентрационных столах хвосты с хвостами материала фракции +5 мм, прошедшими стандартное разделение на шлюзах, отсадочных машинах и концентраторах подвергаются выщелачиванию после дополнительной классификации и гидродинамической активации посредством кавитационных реакторов.

Дополнительная активация будет способствовать интенсификации процесса выщелачивания. С учетом влияния объемного расхода гидросмеси, гидродинамической мощности и формируемого термодинамического потенциала системы минеральная составляющая претерпевает изменения в сторону активного разрушения структурных и физико-механических связей мелких глинистых частиц,

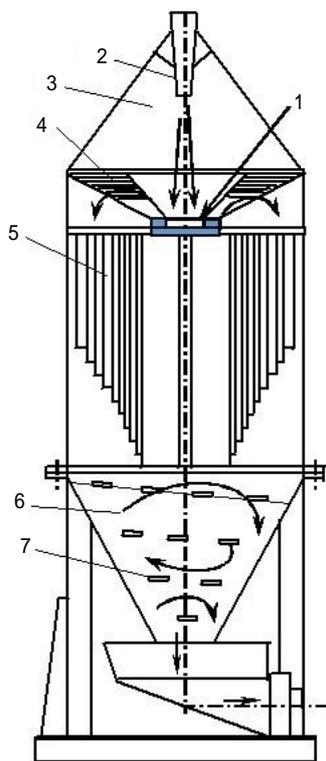


Рис. 3. Гидродинамический генератор:

1 – отражательная плоская поверхность; 2 – сопло; 3 – диффузор; 4 – перфорированные поверхности; 5 – ребра вертикальных пластинчатых кавитационных элементов; 6 – конфуззор; 7 – кавитационные порошки

Fig. 3. Hydrodynamic generator:

1 – reflecting flat surface; 2 – nozzle; 3 – diffuser; 4 – perforated surfaces; 5 – ribs of vertical plate cavitation elements; 6 – confuser; 7 – cavitation steps

¹ Пат. № 2646270, Российская Федерация, МПК В03В 5/00. Способ инициирования кавитационно-гидродинамической микродезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси: патент РФ / Н. П. Хрунина. Заявл. 12.04.2017; опубл. 02.03.2018. Бюл. № 7.



Рис. 4. Технологическая схема переработки высокоглинистых россыпей с использованием гидродинамических генераторов и кавитационных реакторов стационарного типа
Fig. 4. Flow diagram of high clay placer processing using hydrodynamic generators and stationary cavitation reactors

включающих ценные компоненты. В зависимости от типа структурных связей изменяются морфометрические и энергетические параметры системы. Данный эффект преобразования интенсифицирует физико-химическое влияние реагентов, обеспечивая снижение их расхода. Выполненные лабораторные исследования по активации подтверждают эффективность процесса извлечения ценных компонентов.

По укрупненным оценкам технологическая эффективность предлагаемой технологии с использованием дополнительной активации процесса образования микрочастиц дисперсоида по сравнению с известными технологиями на основе гравитационных методов извлечения ценных компонентов эффективнее в 3 раза. Использование установок, работа которых основана на новом принципе формирования гидродинамических явлений в гидропотоке, обеспечит эффективное разрушение ми-

неральной составляющей при низкой энергоёмкости, определяющейся отсутствием вращающихся элементов внутри корпуса кавитационных реакторов. Установки обеспечат высокую экологическую эффективность всего процесса путем снижения расхода весьма токсичных растворов для выщелачивания. Проблема извлечения тонкодисперсных частиц ценных компонентов из высокоглинистых россыпей и руд экологически более эффективным методом на основе интенсификации процесса микродезинтеграции остается актуальной.

Заключение

Таким образом, на основе теории изменения термодинамического потенциала поверхностей частиц при гидродинамическом воздействии автором представлен метод определения параметров изменения структурной составляющей гидросмеси в закрытой полости



генератора при взаимодействии с элементами ограждающих и отражающих поверхностей. В ходе проведенного исследования посредством численных расчетов обосновано увеличение удельной межфазной поверхности дисперсоида минеральных частиц на основе анализа гидродинамических явлений и взаимодействий, моделируемых стационарными отражательными элементами. Расчетным путем установлено существенное увеличение удельной межфазной поверхности дисперсоида минеральной составляющей. При направленной подаче гидросмеси из сопла в закрытую полость увеличение составило от 3 до 4 раз. Установлено, что конструктивные параметры системы генератора с включением

трех отражательных элементов более эффективны по сравнению с использованием двух элементов.

Помимо прочего, разработаны практические рекомендации по проектированию и применению гидродинамических генераторов для дезинтеграции высокоглинистых песков с повышенным содержанием мелкого и тонкодисперсного золота. Предложена новая конструкция гидродинамического генератора и технологическая схема для встраивания генераторов. Полученные предварительные данные и конструктивные решения, особенно в комбинации с процессами выщелачивания, перспективны для дальнейших исследований и требуют своего развития.

Список источников

1. Евдокимов С. И., Герасименко Т. Е., Троценко И. Г. Технико-экономическое обоснование эффективности совместной переработки руд и россыпей золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2020. Т. 18. № 4. С. 12–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-12-23>.
2. Суримбаев Б. Н., Каналы Е. С., Болотова Л. С., Шалгымбаев С. Т. Оценка гравитационной обогатимости золотосодержащей руды – GRG // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5. № 2. С. 92–103. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-92-103>.
3. 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.
4. Алексеев В. С., Серый Р. С., Соболев А. А. Повышение извлечения мелкого золота на промышленном приборе шлюзового типа // Обогащение руд. 2019. № 5. С. 13–18. <https://doi.org/10.17580/or.2019.05.03>.
5. Кочнев В. Г., Грушинская О. В. Дезинтеграция труднопромывистых песков с высокопластичной глиной // Золотодобыча. 2021. № 267. [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/12508> (11.04.2022).
6. De Michelis I., Olivieri A., Ubaldini S., Ferella F., Beolchini F., Vegliò F. Roasting and chlorine leaching of gold-bearing refractory concentrate: experimental and process analysis // International Journal of Mining Science and Technology. 2013. Vol. 23. Iss. 5. P. 709–715. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.08.015>.
7. 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. 2019. Vol. 119. Iss. 1. P. 63–69. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2019/v119n1a8>.
8. Sakuhuni G., Altun N. E., Klein B., Tong L. A novel laboratory procedure for predicting continuous centrifugal gravity concentration applications: the gravity release analysis // International Journal of Mineral Processing. 2016. Vol. 154. P. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.07.004>.
9. Sun X., Chen S., Liu J., Zhao S., Yoon J. Y. Hydrodynamic cavitation: a promising technology for the industrial-scale synthesis of nanomaterials // Frontiers in Chemistry. 2020. Vol. 8. P. 259. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00259>.
10. 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. 2019. Vol. 52. P. 326–335. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.004>.
11. Gałol M., Przyjazny A., Boczkaj G. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – a review // Chemical Engineering Journal. 2018. Vol. 338. P. 599–627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>.
12. Gałol M., Soltani R. D. C., Przyjazny A., Boczkaj G. Effective degradation of sulfide ions and organic sulfides in cavitation-based advanced oxidation processes (AOPs) // Ultrasonics Sonochemistry. 2019. Vol. 58. P. 104610. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.027>.
13. Kim H., Koo B., Sun X., Yoon J. Y. Investigation of sludge disintegration using rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor // Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 240. P. 116636. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116636>.
14. Кононов А. В., Дуйсебаев Б. О. Интенсификация сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу ультразвуком // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5. № 1. С. 12–24. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-12-24>.
15. Wu J., He J., Christakos G. Quantitative analysis and modeling of earth and environmental data: space-time



and spacetime data considerations. Amsterdam: Elsevier, 2021. 420 p.

16. Elshin V. V., Melnik S. A. Current status and perspectives of development technology gold desorption from the saturated activated carbon // *Austrian journal of technical and natural sciences*. 2014. Vol. 9-10. P. 114–118.

17. Chen J., Xu Z., Chen Y. Electronic structure and surfaces of sulphide minerals: density functional theory and applications. Amsterdam: Elsevier, 2020. 396 p.

18. Хрунина Н. П., Чебан А. Ю. Обоснование гидродинамической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси высокоглинистых песков россыпей благородных металлов // *Георесурсы*. 2018. Т. 20. № 1. С. 51–56. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.1.51-56>.

19. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008. 270 с.

20. Кулагин В. А. Суперкавитация в энергетике и гидротехнике: монография. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2000. 107 с.

References

1. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E., Trotsenko I. G. Feasibility study of the joint processing of gold ores and placers. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2020; 18(4):12-23. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-4-12-23>.

2. Surimbayev B. N., Kanaly E. S., Bolotova L. S., Shalgymbayev S. T. Assessment of gravity dressability of gold ore – GRG test. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):92-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-92-103>.

3. Mamaev U. A., Khrunina N. P. Determination of optimal initial operation factors sonic impact on pulp in rock pool to open the exploitation of the mineral deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2009;7:187-191. (In Russ.).

4. Alekseev V. S., Seryy R. S., Sobolev A. A. Improving fine gold recovery in sluice boxes. *Obogashchenie rud*. 2019;5:13-18. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2019.05.03>.

5. Kochnev V. G., Grushinskaya O. V. Disintegration of hard-to-wash sands and highly plastic clay. *Zolotodobycha*. 2021;267. Available from: <https://zolotodb.ru/article/12508> [Accessed 11th April 2022]. (In Russ.).

6. De Michelis I., Olivieri A., Ubaldini S., Ferella F., Beolchini F., Vegliò F. Roasting and chlorine leaching of gold-bearing refractory concentrate: experimental and process analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2013;23(5):709-715. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.08.015>.

7. 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*. 2019;119(1):63-69. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2019/v119n1a8>.

8. Sakuhuni G., Altun N. E., Klein B., Tong L. A novel laboratory procedure for predicting continuous centrifugal gravity concentration applications: the gravity release analysis. *International Journal of Mineral Processing*. 2016; 154:66-74. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.07.004>.

9. Sun X., Chen S., Liu J., Zhao S., Yoon J. Y. Hydrodynamic cavitation: a promising technology for the industrial-scale synthesis of nanomaterials. *Frontiers in Chemistry*. 2020;8:259. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00259>.

10. 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*. 2019;52:326-335. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.004>.

11. Gałol M., Przyjazny A., Boczkaj G. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – a review. *Chemical Engineering Journal*. 2018;338:599-627. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>.

12. Gałol M., Soltani R. D. C., Przyjazny A., Boczkaj G. Effective degradation of sulfide ions and organic sulfides in cavitation-based advanced oxidation processes (AOPs) // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019. Vol. 58. P. 104610. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.05.027>.

13. Kim H., Koo B., Sun X., Yoon J. Y. Investigation of sludge disintegration using rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor. *Separation and Purification Technology*. 2020;240:116636. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116636>.

14. Kononov A. V., Duisebayev B. O. Ultrasonic intensification of uranium sorption from pregnant solutions by ion-exchange resin. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):12-24. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-1-12-24>.

15. Wu J., He J., Christakos G. *Quantitative analysis and modeling of earth and environmental data: space-time and spacetime data considerations*. Amsterdam: Elsevier; 2021. 420 p.

16. Elshin V. V., Melnik S. A. Current status and perspectives of development technology gold desorption from the saturated activated carbon. *Austrian journal of technical and natural sciences*. 2014;9-10:114-118. (In Russ.).

17. Chen J., Xu Z., Chen Y. *Electronic structure and surfaces of sulphide minerals: density functional theory and applications*. Amsterdam: Elsevier; 2020. 396 p.

18. Khrunina N. P., Cheban A. Yu. Substantiation of the hydrodynamic disintegration of hydraulic fluid's mineral component of high-clay sand in precious metals placers. *Georesursy = Georesources*, 2018;20(1):51-56. <https://doi.org/10.18599/grs.2018.1.51-56>.

19. Sirotyuk M. G. *Acoustic cavitation*. Moscow: Nauka; 2008. 270 p. (In Russ.).

20. Kulagin V. A. *Supercavitation in power engineering and hydraulic engineering*. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Technical University; 2000. 107 p. (In Russ.).

**Информация об авторе / Information about the author****Хрунина Наталья Петровна,**

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории разработки россыпных месторождений,
Институт горного дела ДВО РАН – обособленное подразделение
Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН,
г. Хабаровск, Россия,
npetx@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-8117-0922>.

Natalia P. Khrunina,

Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher of the Laboratory of Placer Deposit Development,
Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences –
an autonomous subdivision of the Khabarovsk Federal Research Center
of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia,
npetx@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0001-8117-0922>.

Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 10.06.2022; одобрена после рецензирования 14.07.2022; принята к публикации 18.08.2022.

The article was submitted 10.06.2022; approved after reviewing 14.07.2022; accepted for publication 18.08.2022.