

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.1.51-56>

УДК 622.271.1:622.236.73

Обоснование гидродинамической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси высокоглинистых песков россыпей благородных металлов

Н.П. Хрунина, А.Ю. Чебан**Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия*

Анализируются общие закономерности и теоретические подходы, определяющие гидроимпульсные эффекты воздействия на минеральную составляющую гидросмеси, применительно к дезинтеграции высокоглинистых песков золотоносных россыпей. Теоретические выводы по гидродинамическому воздействию на твердую составляющую гидросмеси дают представления о возникающих процессах в многокомпонентных средах при гидродинамических воздействиях, инициируемых различными источниками физического и механического влияния. Отмечается, что теоретическое обоснование структурно сложного гидродинамического воздействия на гидросмесь с образованием явлений, возникающих в результате столкновения элементов твердой составляющей друг с другом и препятствиями, включает учет изменения таких силовых характеристик, как скорость, давление, мощность потока, а также изменения конструктивных параметров и характеристик среды.

Предложен концептуальный подход к теоретическому обоснованию процесса дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси на примере предлагаемой установки. Расчет экономических показателей по использованию гидродинамического генератора в сравнении с процессами на основе известных технологий показало существенные преимущества применения предлагаемой установки, способной повысить производительность и качественные показатели производства.

Ключевые слова: гидросмесь, минеральная составляющая, дезинтеграция, струйное разделение, кавитация

Для цитирования: Хрунина Н.П., Чебан А.Ю. (2018). Обоснование гидродинамической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси высокоглинистых песков россыпей благородных металлов. *Георесурсы*, 20(1), с. 51-56. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.1.51-56>

В настоящее время в Дальневосточном регионе вовлекаются в эксплуатацию новые типы россыпей, ранее не относившиеся к промышленным объектам по содержанию ценных компонентов. Значительное количество разведанных в Приамурье россыпей характеризуется мелким золотом и повышенным содержанием глинистых фракций. Согласно данным геологических исследований золотосодержащих россыпей Дальнего Востока России, более 60% являются глинистыми. Анализ россыпных месторождений Приамурья показал, что многие из них могут быть отнесены к сложным по переработке из-за значительного объема мелкого золота (фракции менее 0,5 мм составляют более 90%, а размер золотинок менее 0,1 мм – до 26%). Примером может служить месторождение Кутума, ситовый анализ золотоносного пласта которого показал содержание золота класса крупности 0,16-0,63 мм до 93% (рис. 1) (Хрунина и др., 2011).

Месторождение Кутума находится в Сутарском золотоносном районе, в зоне правобережного притока реч. Сутара. Длина россыпи – 4 км; средняя ширина – 62,1 м; мощность рыхлых отложений – 5,4 м; мощность торфов – 3,1 м; мощность песков – 2,3 м. Состав рыхлых отложений: почвенно-растительный слой – 0-0,3 м; торф с илом – 0,3-1,2 м; кварц-полевошпатовый песок мелко-среднезернистый с илом, редкими обломками гранитов, в

низах прослой торфа и бурой глины (0,5-1,0 м) – 1,2-3,0 м; кварц-полевошпатовый песок грубозернистый с дресвой, щебнем и небольшим количеством гальки – 3-5 м. Гранулометрический состав рыхлых отложений месторождения Кутума представлен в таблице 1, ситовый анализ золота – в таблице 2. Нижние части золотоносного пласта входят в разрушенные граниты. На террасах больше глинистой фракции.

Высокая энергоемкость применяемых горных машин и технологического оборудования, низкое качество процесса дезинтеграции высокоглинистых песков россыпей, значительные потери ценных компонентов, превышающие 50%, обусловленные не только отклонениями технологических режимов от оптимальных значений, но и несовершенством конструкций машин, снижает эффективность переработки золотосодержащих песков (Мамаев и др., 2015).

Одной из фундаментальных задач процессов разрушения в жидких средах является выяснение природы возникновения и распространения волн, взаимодействующих с деформируемыми телами (Ганиев, Украинский, 2011; Кулагин, 2000; Руденко, 1993; Федоткин, Немчин, 1984). Процессы преобразования энергии между колебательными и поступательными формами движения могут вызывать как усиление колебаний, так и появление однонаправленных потоков.

* Ответственный автор: Хрунина Наталья Петровна
E-mail: npretx@mail.ru

© 2018 Коллектив авторов

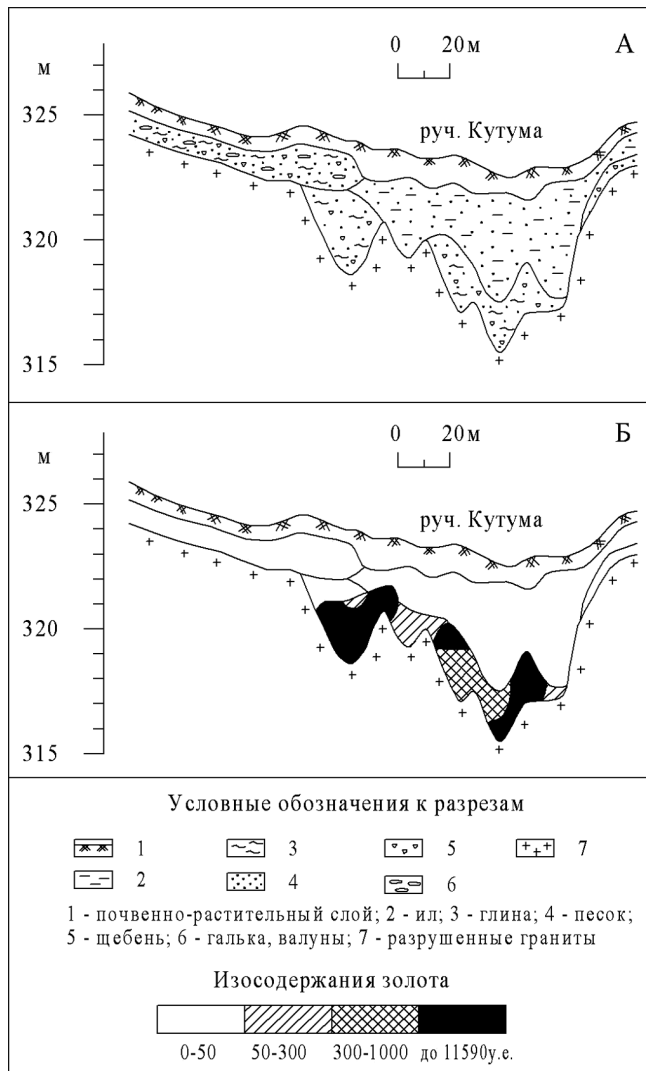


Рис. 1. Поперечные разрезы россыпи Кутума: А – литологический разрез; Б – разрез золотоносности

Фракции, мм	-2	2-10	10-200	200-300
Состав, %	46,9	43,3	11,3	0,5

Табл. 1. Гранулометрический состав рыхлых отложений месторождения Кутума

Класс крупности, мм	-0,16	0,16-0,63	0,63-2,5
Состав, %	3	93	4

Табл. 2. Ситовый анализ золота месторождения Кутума

Постановка проблемы и анализ подходов к ее решению

Понимание сложных механизмов взаимодействия волн, динамики их распространения и кавитации может позволить управлять этими процессами (Хрунина, 2014). Рассмотрено (Кизевальтер, 1979) равновесие действующих на частицу сил при гравитационном разделении твердого в гидросмесьях, которое выражается зависимостью:

$$V\rho_T g - Vg \left[(1 - m) \int_{\rho_{T1}}^{\rho_{T2}} \gamma d\rho_T + m\rho_{cp} \right] - VK_m \frac{1}{\gamma(\rho_T)} grad \gamma(\rho_T) - av = 0, \quad (1)$$

где V – объем частицы; ρ_T – плотность частицы;

m – содержание среды (воды) в единице объема взвеси; g – вектор ускорения силы тяжести; γ – функция распределения частиц по плотности, $\int_{\rho_{T1}}^{\rho_{T2}} \gamma d\rho_T$ – доля фракции

в диапазоне изменения плотности от ρ_{T1} до ρ_{T2} ; ρ_{cp} – средняя плотность среды; v – вектор средней скорости частицы; K_m, a – коэффициенты.

Теоретические выводы по гравитационному разделению твердого в гидросмесьях дают общие представления о возникающих процессах в многокомпонентных средах при гидродинамических воздействиях, инициируемых различными источниками физического и механического влияния.

Цель исследований – на основе анализа аспектов гидродинамических явлений и взаимодействий выработать подход к обоснованию процесса дезинтеграции высокоглинистых песков в условиях изменения давления потока с образованием завихрений, скачков уплотнения и разряжения гидросмеси.

Результаты исследования и их обсуждение

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. Гидросмесь при дезинтеграции представляет собой жидкость с твердыми включениями. Известно, что прочность жидкости резко снижается при содержании в ней твердых частиц или газовых включений. Исходя из молекулярной теории, растягивающее давление, необходимое для возникновения разрывов в воде при 20 °С, составляет 3200 кГ/см². Однако явление кавитации наблюдается в жидкости задолго до достижения значения растягивающего усилия. Это свидетельствует о том, что в процессе кавитации происходит разрыв кавитационной полости в местах тепловых флуктуаций жидкости. При этом разрыв жидкости происходит на границе с твердой поверхностью взвешенных частиц. Кроме того, инициаторами появления кавитационных эффектов могут быть микротрещины твердых взвешенных частиц; различная степень смачивания частиц также может способствовать образованию кавитационных разрывов (Круглицкий, 1971).

Для исследования процесса дезинтеграции посредством кавитации были отобраны пробы высокоглинистых песков одного из участков месторождения Бешеный Приморского края. Образцы проб навеской 150 г помещались в воду и подвергались кавитации посредством установки IMANASHI (модель USD150B). Производилась оценка дезинтеграции по изменению массы минеральных частиц, отделившихся от образца. Отделившаяся с водой часть минеральных частиц сливалась, высушивалась в печи и после остывания взвешивалась на лабораторных электронных весах OHAUS Scout Pro SPU202 (Mettler Toledo, Китай) с систематической погрешностью $\pm 0,001$. По результатам исследований установлена зависимость интенсивности кавитации от

массы проdezинтегрированной глинистой составляющей гидросмеси (рис. 2).

Осуществлялось также сравнение процесса дезинтеграции, инициируемого ультразвуковым воздействием и механическим перемешиванием, более мелких образцов и глинистой составляющей гидросмеси. Для этого образцы проб навеской 35-40 г, при средней исходной влажности 12 %, взвешивались на лабораторных электронных весах OHAUS Scout Pro SPU202 (Mettler Toledo, Китай) с систематической погрешностью ± 0,001, после чего помещались в воду, очищенную фильтрованием посредством системы REVERSE OSMOSIS SYSTEM «ATOLL 560». Время воздействия на минеральную смесь с кусочками образцов составляло 5, 10 и 15 мин. Определялась средняя величина удельной межфазной поверхности частиц (фракции менее 0,5 мм) песчано-глинистой составляющей минеральной гидросмеси после механического и кавитационного воздействия (рис. 3). Дисперсность фракции менее 0,5 мм устанавливали с помощью спектра Фурье в среде минеральной гидросмеси посредством лазерного дифракционного микроанализатора «Analysette 22 MicroTec Plus» (Fritsch GmbH, Германия), работающего на основе сходящегося лазерного луча и использующего физический принцип рассеяния электромагнитных волн для определения распределения частиц по размерам. Оценка случайных погрешностей выполнялась на основе метода Стьюдента при величине надежности 0,95 и количестве измерений $n = 5$, а исключение грубых ошибок статистического ряда – по правилу трех сигм.



Рис. 2. Зависимость степени дезинтеграции песчано-глинистой составляющей минеральной гидросмеси от интенсивности кавитации, при времени воздействия (мин): 5(1); 10(2); 15(3)

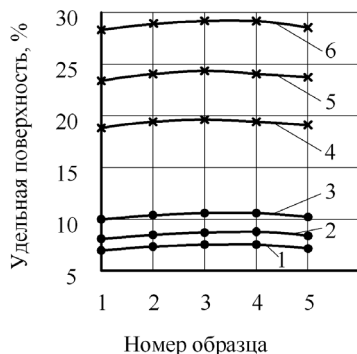


Рис. 3. Зависимость интенсивности дезинтеграции при 5, 10 и 15 мин соответственно: 1-3 – при механическом воздействии перемешиванием; 4-6 – при кавитации ультразвуком

Рассматривая в теоретическом плане, предлагаемую к практическому использованию установку (Хрунина, 2014), можно выделить в ряде зон ее рабочего пространства моделируемые гидродинамические эффекты, которые инициируются кавитацией, в том числе за счет конфигурации корпуса, создающего изменения давления гидросмеси на входе – в диффузоре, переходящем в конфузур (рис. 4). Обработка материала будет осуществляться в условиях активных гидродинамических воздействий посредством влияния, размещенных внутри корпуса гидродинамического генератора, соосно и последовательно соединенных стационарных кавитационных элементов. В установке нет подвижных элементов. Затраты энергии идут только на подачу пульпы под давлением.

Начальный этап дезинтеграции осуществляется посредством скоростной подачи струи через входное отверстие непосредственно на отражательную сферическую поверхность 1, расположенную в верхней части корпуса и сопрягающуюся в основании нижней своей части с последовательно установленными конусообразными кавитационными поверхностями. Отражательная сферическая поверхность 1 со стенками диффузора формирует скачок уплотнения, переходящий в тороидальную кавитационную зону с усилением осцилляций скачка и возникновением полей первичной гидродинамической и вторичной акустической кавитации в гидросмеси. С высоким градиентом давления гидросмесь последовательно попадает на конусообразные кавитационные поверхности со щелеобразными отверстиями и лопастями. Лопасти играют роль дополнительных кавитаторов. Гидросмесь кавитирует и разделяется на тонкие струи, проходя сквозь щелеобразные отверстия. Далее гидросмесь попадает в зону ступенчатого конфузора. С помощью пакетов подвижных упругих пластинчатых кавитационных элементов, выполненных с изгибами и провисанием относительно крепления, осуществляется дополнительное струйное разделение с усилением кавитационно-акустического воздействия на минеральную составляющую гидросмеси и получение заданного среднего значения объемной

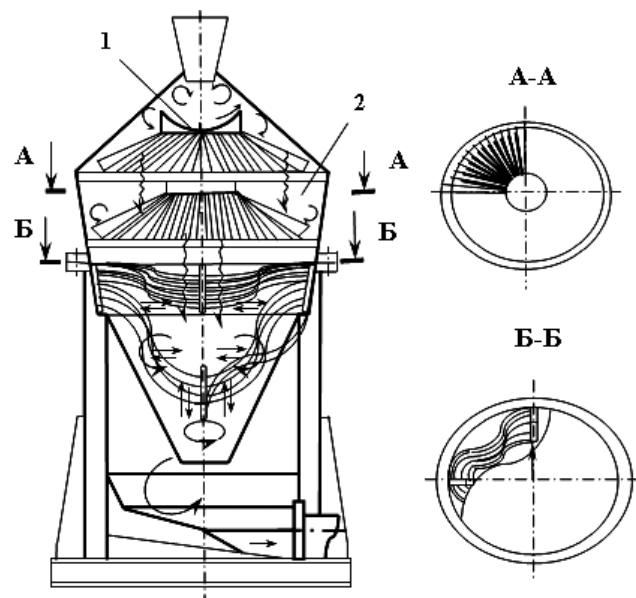


Рис. 4. Гидродинамический генератор струйно-акустической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси

плотности мощности гидродинамического возмущения для обеспечения градиента давления с превышением предела прочности микрочастиц. На выходе обеспечивается получение минеральных компонентов гидросмеси с размером частиц в пределах 1-2 мкм. Расположение промежуточных креплений нижнего пакета упругих пластинчатых кавитационных элементов со значительным смещением в вертикальной плоскости обеспечивает значительное вихреобразование как по направлению потока гидросмеси, так и перпендикулярно ему. Частотный диапазон получаемого излучения при кавитации в процессе дезинтеграции может находиться в интервале 0,4-40 кГц (Мамаев, Хрунина, 2008), а максимум звукового давления регулироваться скоростью истечения струи из входного отверстия.

В зоне давления струи минеральной гидросмеси на ограждающую поверхность 1, без учета утопленной струи в верхней области расширения-диффузоре, давление струи определяется по формуле (Идельчик, 1975):

$$P = \frac{\gamma}{g} Qv(1 + \cos\beta) = \rho Qv(1 + \cos\beta) = \\ = \rho Qv(1 + (-0,5)) = 0,5\rho Qv, \quad (4)$$

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; ρ – плотность гидросмеси.

В зоне сужения-конфузора 2 потеря напора определяется по формуле (Идельчик, 1975):

$$h = \zeta_{суж} \frac{v_2^2}{2g}, \quad (5)$$

где коэффициент сопротивления сужения определяется по полуэмпирической формуле:

$$\zeta_{суж} = 0,5 \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right) = 0,5 \left(1 - \frac{1}{n}\right), \quad (6)$$

в которой $n = S_1/S_2$ – степень сужения.

Следует также учитывать гидродинамические эффекты в следующих зонах установки, лежащих ниже. Интенсивность гидродинамической кавитации, обеспечивающей разрушение минеральной составляющей гидросмеси на конечной стадии, будет пропорциональна изменению скорости водного потока (Промтов, 2001)

$$I = (V - V_{кр})^n, \quad (7)$$

где V – начальная скорость потока при входе в конфузор; $V_{кр}$ – критическая скорость, соответствующая моменту начала кавитационных разрушений; n – показатель степени, определяемый по экспериментальным данным.

Анализ явлений, происходящих в рассматриваемых условиях, требует своего дальнейшего развития. Кроме того, главным фактором, интересующим нас, является результат разрушения, дезинтеграции твердой минеральной составляющей гидросмеси. Исследуемый процесс вихревого и импульсного гидродинамического воздействия на твердую составляющую включает упругопластическую деформацию и разрушение с образованием новых поверхностей мелких частиц S , которое будет зависеть от интенсивности гидродинамической кавитации:

$$S = f(I) = f[(V - V_{кр})^n]. \quad (8)$$

Эффективность дезинтеграции зависит от физико-механических особенностей высокоглинистых песков, в том числе воздействия среды, и различных типов гидродинамического воздействия. В гидродинамическом генераторе основными силами воздействия являются гидродинамические силы потока, а также механические силы взаимодействия частиц между собой, со стенками и другими элементами генератора. Одним из факторов, который надо учитывать при обосновании дезинтеграции на микроуровне, является изучение влияния водонасыщения на высокоглинистые пески россыпей. Применение новых подходов к оценке влияния водонасыщения на процессы дезинтеграции высокоглинистых песков и само расширение объектов исследования, при более детальном изучении влияния водонасыщения на упругие характеристики глинистых песков россыпей, расширяет возможности развития теоретических исследований гидродинамических явлений.

Проведено сравнение экономической эффективности процесса переработки высокоглинистых песков (содержание глины выше 30%) с повышенным содержанием мелких и тонких частиц ценных компонентов на основе использования разработанной кавитационной установки (Хрунина, 2014) с двумя базовыми вариантами: на основе физико-химического метода избирательного воздействия полиэлектролитными комплексами (Мязин, 1996) и с использованием широко распространенного комплекса ПГШ-50. Экономическое преимущество дезинтеграции посредством кавитационного инициирования в сравнении с физико-химическим методом избирательного воздействия полиэлектролитными комплексами, согласно методике (Богатин, 1999), заключается в снижении приведенных затрат на новую технологию. Расчеты показали, что использование двух кавитационных генераторов в стандартной схеме обогащения, включающей шлюз глубокого наполнения, систему размыва и классификации, а также тонкослойные винтовые шлюзы, позволяет снизить приведенные затраты на 38 %.

Сравнение процесса дезинтеграции посредством предлагаемой установки с процессом на основе комплекса ПГШ-50 согласно методике (Богатин, 1999) проведено на основе расчета приведенного эффекта, так как данные процессы отличаются объемом производства и качеством производимой продукции (т.е. функциональными решениями поставленных задач). По сравнению с процессом дезинтеграции на основе комплекса ПГШ-50 система с использованием гидродинамических кавитаторов наиболее предпочтительна, поскольку ее приведенный эффект в 4 раза выше, т.е. производительность и качественные показатели производства значительно превосходят не только по экономическим, но и по технологическим показателям.

Заключение

На территории Хабаровского края учтено более 350 месторождений и проявлений золота и золота с серебром. Из 180 месторождений золота, большая часть которых относится к россыпям, в том числе – с повышенным содержанием глинистой составляющей – до 80 % и более, к освоению не готова значительная их часть из-за отсутствия экологически и технологически эффективных технологий. Сюда же можно отнести и Амурскую

область, в которой выявлено около 630 россыпей также со значительным содержанием глинистой составляющей и высоким содержанием фракций с мелкими и тонкими частицами золота и других ценных компонентов. Использование предлагаемой установки на основе гидродинамической кавитации позволит решить поставленную задачу. Теоретическое обоснование структурно сложного гидродинамического воздействия на гидросмесь включает учет изменения таких силовых характеристик, как скорость, давление, мощность потока, а также – изменения конструктивных параметров и характеристик среды. Развитие исследований гидродинамического воздействия на многокомпонентные среды гидросмесей позволит получить сведения, которые обеспечат реализацию технологии по дезинтеграции высокоглинистых песков благородных металлов с рядом существенных преимуществ, в том числе с обеспечением низких энергозатрат. Это позволит получить новые знания об исследуемых процессах и явлениях и решить достаточно острую проблему комплексной переработки минерального сырья эффективными и экологически безопасными физико-механическими способами.

Литература

- Богатин, Ю.В., Швандар В. А. (1999). Оценка эффективности бизнеса и инвестиций. Москва: Финансы, ЮНИТИ – ДАНА, 254 с.
- Ганиев О.Р., Украинский Л.Е. (2006). Экспериментальное исследование однонаправленных течений в пористой среде, насыщенной жидкостью, при волновом воздействии. *ДАН*, 409(1).
- Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. (2011). Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. Изд. 2-е, дополн. Москва: Институт компьютерных исследований; Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 780 с.
- Идельчик И.Е. (1975). Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва: Машиностроение.
- Кизевальтер Б.В. (1979). Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. Москва: Недра, 295 с.
- Круглицкий Н.Н., Ничипоренко С.П., Симуров В.В., Миненко В.В. (1971). Ультразвуковая обработка дисперсий глинистых минералов. Киев: Наукова думка, 200 с.
- Кулагин В.А. (2000). Суперкавитация в энергетике и гидротехнике. Красноярск: КГТУ, 157 с.
- Мамаев Ю.А., Хрунина Н.П. (2008). Определение оптимальных параметров ультразвукового излучения при воздействии на краевые

зоны золотосодержащих песков россыпей. Известия высших учебных заведений. *Горный журнал*, с. 71-74.

Мамаев Ю.А., Хрунина Н.П. (2009). Перспективы освоения глинистых россыпей Приамурья. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 5(2), с. 47-57.

Мязин В.П. (1996). Повышение эффективности переработки глинистых золотосодержащих песков. Ч. 2. Чита: ЧитГТУ, 119 с.

Промтов М.А. (2001). Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. Москва: Машиностроение, 260 с.

Руденко М.Г. (1993). Характеристики кавитационных устройств технологического назначения: дисс. канд. техн. наук. Красноярск, 148 с.

Федоткин И.М., Немчин А.Ф. (1984). Использование кавитации в технологических процессах. Киев: Вища школа. Изд-во при Киев. ун-те, 68 с.

Хрунина Н.П., Мамаев Ю.А., Пуляевский А.М., Стратечук О.В. и др. (2011). Новые аспекты научных основ ультразвуковой дезинтеграции высокоглинистых золотосодержащих песков россыпей Приамурья. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 155 с.

Хрунина Н.П., Чебан А.Ю. (2015). Оценка влияния водонасыщения на дезинтеграцию высокоглинистых песков при разработке россыпей благородных металлов. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*, 4(52), с. 50-55.

Хрунина Н.П. (2014). Пат. 2506128. Российская Федерация, МПК В03В5/00. Способ дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси в условиях резонансных акустических явлений в гидротоке и геотехнологический комплекс для его осуществления.

Хрунина Н.П. (2014). Пат. 2506127. Российская Федерация, МПК В03В5/00. Способ струйно-акустической дезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси и гидродинамический генератор акустических колебаний.

Сведения об авторах

Наталья Петровна Хрунина – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН

Россия, 680000, Хабаровск, Тургенева, 51, Россия.

Тел: +7 4212 32-79-27; +7 4212 31-17-06.

E-mail: npetx@mail.ru

Антон Юрьевич Чебан – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент, Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН

Россия, 680000, Хабаровск, Тургенева, 51, Россия.

Тел: +7(4212) 327 927. E-mail: chebanay@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.09.2016;

Принята к публикации 19.12.2017;

Опубликована 30.03.2018

IN ENGLISH

Substantiation of the hydrodynamic disintegration of hydraulic fluid's mineral component of high-clay sand in precious metals placers

N.P. Khrunina, A.Yu. Cheban

Institute of Mining, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

**Corresponding author: Natalia P. Khrunina, e-mail: npetx@mail.ru*

Abstract. General regularities and theoretical approaches determining hydroimpulsive effects on the mineral component of the hydraulic fluid are analyzed, with reference to the disintegration of high-clay sands of gold-bearing placers. Theoretical conclusions on the hydrodynamic effect on the solid component of the hydraulic fluid give insight into emerging processes in multicomponent media under hydrodynamic influences initiated by various sources of physical and mechanical influence. It is noted that the theoretical justifica-

tion of the structurally complex hydrodynamic effect on the hydraulic fluid with the formation of phenomena arising from the collision of solid components with each other and obstacles includes the consideration of changes in such force characteristics as speed, pressure, flow power, and also changes in design parameters and characteristics of the environment.

A conceptual approach is given to the theoretical substantiation of the disintegration of the hydraulic fluid's mineral component using the example of the proposed

installation. Calculation of economic indicators for the use of a hydrodynamic generator in comparison with processes based on known technologies has shown significant advantages of using the proposed installation, which can increase productivity and quality production indicators.

Keywords: hydraulic fluid, mineral component, disintegration, jet separation, cavitation

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

References

Bogatin, Yu.V., Shvandar V. A. (1999). Otsenka effektivnosti biznesa i investitsiy [Evaluation of business and investment efficiency]. Moscow: Finansy, YuNITI – DANA, 254 p. (In Russ.)

Fedotkin I.M., Nemchin A.F. (1984). Ispol'zovanie kavitatsii v tekhnologicheskikh protsessakh [The use of cavitation in technological processes]. Kiev: Vishcha shkola. Kiev. univer. publ., 68 p. (In Russ.)

Ganiev O.R., Ukrainskiy L.E. (2006). Eksperimental'noe issledovanie odnonapravlenykh techeniy v poristoy srede, nasyshchennoy zhidkost'yu, pri volnovom vozdeystvii [Experimental study of unidirectional flows in a porous medium saturated with a liquid under wave action]. *DAN*, 409(1). (In Russ.)

Ganiev R.F., Ukrainskiy L.E. (2011). Nelineynaya volnovaya mekhanika i tekhnologii. Volnovye i kolebatel'nyeyavleniya v osnove vysokikh tekhnologiy [Nonlinear wave mechanics and technology. Waves and oscillations in the basis of high technology]. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy; Nauchno-izdatel'skiy tsentr «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 780 p. (In Russ.)

Idel'chik I.E. (1975). Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Reference book on hydraulic resistance]. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.)

Khrunina N.P., Mamaev Yu.A., Pulyaevskiy A.M., Stratechuk O.V. i dr. (2011). Novye aspekty nauchnykh osnov ul'trazvukovoy dezintegratsii vysokoglinistykh zolotosoderzhashchikh peskov rossypey Priamur'ya [New aspects of the scientific basis of ultrasonic disintegration of high-clay gold-bearing sands of the Amur River placers]. Khabarovsk: Tikhookean. gor. univer., 155 p. (In Russ.)

Khrunina N.P., Cheban A.Yu. (2015). Otsenka vliyaniya vodonasyshcheniya na dezintegratsiyu vysokoglinistykh peskov pri razrabotke rossypey blagorodnykh metallov [Assessment of the influence of water saturation on the disintegration of high-clay sands during the development of placers of precious metals]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University], 4(52), p. 50-55. (In Russ.)

Khrunina N.P. (2014). Patent 2506128. Russian Federation, MPK V03V5/00. Sposob dezintegratsii mineral'noy sostavlyayushchey gidrosmesi v usloviyakh rezonansnykh akusticheskikh yavleniy v gidropotoke i geotekhnologicheskii kompleks dlya ego osushchestvleniya [The method of disintegration of the mineral component of hydraulic fluid under conditions of resonant acoustic phenomena in hydro-flow and the geotechnological complex for its implementation]. (In Russ.)

Khrunina N.P. (2014). Patent 2506127. Russian Federation, MPK V03V5/00. Sposob struyno-akusticheskoy dezintegratsii mineral'noy sostavlyayushchey gidrosmesi i gidrodinamicheskii generator akusticheskikh kolebaniy [The method of jet-acoustic disintegration of a mineral component of hydraulic fluid and a hydrodynamic generator of acoustic oscillations]. (In Russ.)

Kizeval'ter B.V. (1979). Teoreticheskie osnovy gravitatsionnykh protsessov obogashcheniya [Theoretical principles of gravity processes of enrichment]. Moscow: Nedra, 295 p. (In Russ.)

Kruglitskiy N.N., Nichiporenko P.P., Simurov V.V., Minenko V.V. (1971). Ul'trazvukovaya obrabotka dispersiy glinistykh mineralov [Ultrasonic treatment of dispersions of clay minerals]. Kiev: Naukova dumka, 200 p. (In Russ.)

Kulagin V.A. (2000). Superkavitatsiya v energetike i gidrotekhnike [Supercavitation in power engineering and hydraulic engineering]. Krasnoyarsk: KGTU, 157 p. (In Russ.)

Mamaev Yu.A., Khrunina N.P. (2008). Opredelenie optimal'nykh parametrov ul'trazvukovogo izlucheniya pri vozdeystvii na kraevye zony zolotosoderzhashchikh peskov rossypey [Determination of optimal parameters of ultrasonic radiation when exposed to marginal zones of gold-bearing sands of placers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal = Mining Journal*, p. 71-74. (In Russ.)

Mamaev Yu.A., Khrunina N.P. (2009). Perspektivy osvoeniya glinistykh rossypey Priamur'ya [Prospects for the development of clay placers in the Amur region]. *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten = Mining Information and Analytical Bulletin*, 5(2), p. 47-57. (In Russ.)

Myazin V.P. (1996). Povyshenie effektivnosti pererabotki glinistykh zolotosoderzhashchikh peskov [Increasing the efficiency of clayey gold-bearing sands processing]. Ch. 2. Chita: ChitGTU, 119 p. (In Russ.)

Promtov M.A. (2001). Pul'satsionnye apparaty rotornogo tipa: teoriya i praktika [Pulsating apparatuses of rotary type: theory and practice]. Moscow: Mashinostroenie, 260 p. (In Russ.)

Rudenko M.G. (1993). Kharakteristiki kavitatsionnykh ustroystv tekhnologicheskogo naznacheniya [Characteristics of cavitation devices for technological purposes]. Diss. kand. tekhn. nauk. [Cand. engineer. sci. diss.] Krasnoyarsk, 148 p. (In Russ.)

About the Authors

Natalia P. Khrunina – PhD (Engineering), Senior Researcher

Institute of Mining, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

51, Turgenev St., Khabarovsk, 680000, Russian Federation

Phone: +7 4212 32-79-27; +7 4212 31-17-06

E-mail: npetx@mail.ru

Anton Yu. Cheban – PhD (Engineering), Senior Researcher, Associate Professor

Institute of Mining, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

51, Turgenev St., Khabarovsk, 680000, Russian Federation

Phone: +7(4212) 327 927. E-mail: chebanay@mail.ru

Manuscript received 12 September 2016;

Accepted 19 December 2017; Published 30 March 2018