



Научная статья

УДК 622.271.1:622.236.52

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-312-322>

## Совершенствование комплекса средств для гравитационной переработки полиминеральных глинистых песков россыпей Приамурья

Наталья Петровна Хрунина<sup>а</sup><sup>а</sup>Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

**Резюме.** Проблема переработки песков полиминеральных россыпных месторождений Дальневосточного региона представляет собой сложную техническую и технологическую задачу. Отмечено преобладание высокоглинистых россыпей с повышенным содержанием ценных компонентов мелких и тонких фракций, при этом содержание мелкого золота фракции размером менее 0,5 мм на некоторых объектах достигает более 90 % с преобладанием большей частью фракций размером менее 0,3 мм. Подтверждена необходимость усовершенствования технологий и технических средств для переработки высокоглинистых песков россыпей с повышенным содержанием тонкодисперсных и наноразмерных частиц ценных компонентов. В связи с этим целью данного исследования является обоснование подходов к построению феноменологической модели переработки высокоглинистых песков россыпей гравитационными методами для обеспечения сохранности кристаллов и снижения потерь ценных компонентов при сниженной энергоёмкости. На основе предложенной экспоненциальной зависимости изменения удельной межфазной поверхности минеральных частиц от термодинамического потенциала системы установлено, что определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц в условиях турбулизации, инициируемой падающей струей на плоскую поверхность кавитационного реактора, играет взаимозависимость скорости истечения и расхода гидросмеси в условиях увеличения времени воздействия. В результате расчетов установлен рост удельной межфазной поверхности частиц в интервалах 1,8–3,3 раза в зависимости от регулирования расхода гидросмеси, плотности гидросмеси и времени инициирования. Представленные математические зависимости позволяют управлять процессом при проведении испытаний кавитационного реактора, оценить качество и характер работы установки, а также отрегулировать и внести необходимые изменения в конструкцию. Предложена общая схема переработки россыпей с использованием ряда инновационных установок нового типа, в том числе на основе сочетания турбулентности и кавитации при низкой энергоёмкости. Воздействие на гидросмеси высокоглинистых песков гидродинамических эффектов, инициируемых турбулентными эффектами и кавитацией, способно обеспечить надежность микродезинтеграции-диспергирования, обеспечив существенное снижение технологических потерь ценных компонентов. Результаты данной работы могут быть использованы для дальнейшего развития теоретических подходов к описанию кавитационных процессов, моделируемых в предлагаемых установках.

**Ключевые слова:** высокоглинистость, полиминеральность, дезинтеграция, турбулентность, кавитация, кавитационный реактор, низкая энергоёмкость, центробежный концентратор

**Для цитирования:** Хрунина Н. П. Совершенствование комплекса средств для гравитационной переработки полиминеральных глинистых песков россыпей Приамурья // Науки о Земле и недропользование. 2021. Т. 44. № 3. С. 312–322. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-312-322>.

Original article

## Improving the complex of technical facilities for gravitational processing of polymineral clay sands of Amur river basin placers

Natalia P. Khrunina<sup>а</sup><sup>а</sup>Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk Russia

**Abstract.** The problem of processing sands from polymineral placer deposits of the Far Eastern region is a complex technical and technological process. The predominance of high-clay placers with high content of valuable components of small and thin fractions is noted. At the same time the content of fine gold fractions smaller than 0.5 mm reach more than 90 % at some sites with the predominance of fractions smaller than 0.3 mm. The necessity to improve the technologies

© Хрунина Н. П.. 2021



and technical facilities for processing placer high-clay sands with a high content of fine and nanoscale particles of valuable components is substantiated. Therefore, the purpose of the study is to substantiate approaches to the construction of a phenomenological model for processing of placer high-clay sands by gravitational methods to ensure safety of crystals and reduce the loss of valuable components with reduced energy intensity. On the basis of the proposed exponential dependence of variation of specific interfacial surface of mineral particles on system thermodynamic potential, it has been found out that interdependence of hydraulic fluid efflux and flow rates plays a decisive role in microdesintegration of mineral particles under conditions of turbulization initiated by the jet falling on the flat surface of the cavitation reactor. The calculations performed allowed to estimate the growth of the specific interfacial surface of particles in the intervals of 1.8–3.3 times depending on regulation of hydraulic fluid flow rate, its density and initiation time. Presented mathematical dependencies will allow to control the process when testing cavitation reactor, assess installation quality and operation nature, as well as adjust the design and introduce necessary changes. We propose a general processing scheme for placers with the use of a number of innovative installations of a new type including those based on the combination of turbulence and cavitation at low energy intensity. The impact of hydrodynamic effects initiated by turbulent effects and cavitation on hydraulic fluid of high-clay sands is able to ensure reliable microdesintegration-dispersion and provide a significant reduction in technological losses of valuable components. The study results obtained can be used for further development of theoretical approaches to the description of cavitation processes modeled in proposed installations.

**Keywords:** high content of clay, polyminerality, disintegration, turbulence, cavitation, cavitation reactor, low energy intensity, centrifugal concentrator

**For citation:** Khrunina N. P. Improving the complex of technical facilities for gravitational processing of polymineral clay sands of Amur river basin placers. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(3):312-322. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-312-322>.

## Введение

В настоящее время значительную часть аллювиальных природных и техногенных полиминеральных месторождений Дальневосточного региона составляют глинистые и высокоглинистые россыпи, в которых большую долю занимает содержание тонкодисперсного и наноразмерного золота. На некоторых участках объектов месторождений Колчан, Каменистый, Кедровка, Рокосуевский, Ангочикан, Кайгачан, Благодатный-Майнура, Майский, Антуанской площади южной части Хабаровского края содержание мелкого золота фракции размером менее 0,5 мм достигает более 90 % с преобладанием большей частью фракций размером менее 0,3 мм. Также, согласно данным геологических исследований, золотоносные россыпи Дальнего Востока России содержат в некоторых случаях до 90 % глинистой фракции. В настоящее время потери мелкого и тонкого золота в процессе эксплуатации высокоглинистых россыпей порой достигают 80 % [1, 2]. Обоснована возможность совместной переработки золотосодержащих руд и техногенных отходов россыпной золотодобычи: это дает возможность рассматривать в комплексе минерально-сырьевые базы как запасы единого месторождения. Данный подход обеспечивает снижение

удельных капитальных вложений и эксплуатационных затрат за счет увеличения производственной мощности предприятия. Использование несовершенных технологий дражной и гидравлической разработки золотоносных песков приводит к значительным потерям мелкого, тонкого золота и золота в сростках<sup>1</sup> [3, 4]. Основопологающим экологически чистым и рентабельным направлением развития технологий может стать процесс, способный осуществить микродезинтеграцию высокоглинистых песков гравитационным способом с наименьшими энергетическими затратами.

В уплотненной высокоглинистой среде частицы песков и минеральных компонентов имеют достаточно прочные структурные связи. Ряд работ посвящен текущему состоянию и перспективам развития технологий извлечения золота с использованием активированного углерода [5], исследованию распада замороженных пород под воздействием химических полей и водной среды [6], выщелачиванию золота хлором [7], интенсивному цианированию золота из гравитационных концентратов в аппаратах барабанного типа [8]. Использование активированного углерода может иметь место в силу своих нейтральных воздействий на окружающую среду, но при использовании выщелачивающих растворов

<sup>1</sup> Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебник для студентов вузов. М.: Химия, 1982. 399 с.



и других активных реагентов необходим учет экологических аспектов воздействия химических компонентов. В настоящее время развиваются исследования по усовершенствованию экологически более безопасных гравитационных методов переработки [9, 10]. Из-за отрицательного влияния на технологический процесс окатышей глины, образующихся на наклонных грохотах с круговой амплитудой колебаний, а также процесса окомкования при применении скруббер-бутар для более полноценной работы комплекса рекомендовано использовать два двухдечных промывочных горизонтальных грохота с линейной амплитудой колебаний. Также для частичного устранения данных недостатков предложена установка Haver Hydro-Clean, предназначенная для отделения глинистых агрегатов от кристаллической части минерального сырья путем их дезинтеграции с промывкой под высоким давлением воды [11]. К недостаткам данной конструкции можно отнести сложность изготовления и эксплуатации, а также дополнительное энергопотребление, затрачиваемое на вращение ротора и дополнительную подачу воды. Кроме того, применение данной конструкции на объектах с преимущественно тонкодисперсными частицами ценных компонентов не обеспечит снижение их потерь. Анализ работы барабанных дезинтеграторов и гидравлических центробежных дезинтеграторов, которые являются наиболее известными новейшими и испытанными в производственных условиях конструкциями, показывает, что данные установки применимы для предварительной дезинтеграции глинистых песков [12]. К недостаткам их эксплуатации можно отнести неизбежное окомковывание с образованием глинистых окатышей при повышенном содержании глины в песках. Однако надо отметить, что тангенциальный и противоточный принцип подачи пульпы в гидравлические центробежные дезинтеграторы, а также использование кавитирующих элементов на внутренней поверхности при определенной доработке позволяют надеяться на существенное достижение необходимого эффекта при использо-

вании на высокоглинистых россыпях. Развиваются нетрадиционные высокоэнергетические методы исследования дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов на основе излучающих систем, в том числе ультразвуковых [13, 14]. Тем не менее данные технологии в сильной степени энергозатратны и пока не находят широкого применения в производстве. Известны исследования обогатимости материала, полученного посредством технологии, включающей три последовательно чередующиеся стадии измельчения и гравитации при помощи центробежного концентратора, которая подтвердила эффективность извлечения наноразмерного золота гравитационным способом [15]. Ряд исследований подтверждает комплексное использование гравитационных методов измельчения и центробежной классификации с использованием аппарата Knelson и других<sup>2</sup> [16, 17]. В работах [18–23] отмечаются достижения в области развития технологий гравитационного извлечения золота и описываются пути развития процессов переработки полезных ископаемых посредством прогнозирования и практической доработки с использованием стандартизированного теста. Общий недостаток представленных разработок заключается в сравнительно низкой эффективности процесса при переработке глинистых песков россыпей с повышенным содержанием тонкодисперсных и наноразмерных частиц ценных компонентов и высокой энергоемкости. Важным фактором при дезинтеграции песков рудно-россыпных месторождений также является недопустимость переизмельчения для обеспечения сохранности кристаллической структуры ценных компонентов. В работе [24] предлагается схема переработки с увеличенным числом стадий измельчения и классификации при небольших энергиях измельчения. Предложена комбинированная схема переработки сырья, включающая механоактивационное измельчение в процессе гидрохимической доводки.

Анализ функциональных особенностей известных решений подтвердил необходимость

<sup>2</sup> Knelson™ semi-continuous gravity concentrator // Flsmidth.com. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/precious-metals-recovery/knelson-semi-continuous-gravity-concentrator>. (16.05.2021).



усовершенствования технологий и технических средств для переработки высокоглинистых песков россыпей с повышенным содержанием тонкодисперсных и наноразмерных частиц ценных компонентов. Фенологическим путем определено «узкое» место в процессах переработки – это недостаточная эффективность микродезинтеграции глинистых песков россыпных и рудно-россыпных месторождений. В связи с этим целью представленного исследования является обоснование подходов к построению феноменологической модели переработки высокоглинистых песков россыпей гравитационными методами для обеспечения сохранности кристаллов и уменьшения потерь ценных компонентов при сниженной энергоемкости.

### **Материалы и методы исследований**

Одним из главных аспектов обоснования подходов построения феноменологической модели процесса микродезинтеграции является рассмотрение описаний и методик расчета дезинтеграции минеральных компонентов в жидкой среде с щадящим воздействием, инициирующем эффекты влияния на микроуровне. Исследования дезинтеграции песков с повышенным содержанием глин лежат в области происходящих физико-механических, физико-химических и гидродинамических явлений при взаимодействии рабочих органов или активирующих растворов с породной массой. К ним относятся разнообразные эффекты понижения прочности вследствие влияния поверхностно-активной среды, инициирующей понижение удельной свободной поверхностной энергии твердого тела. В работе [25] указывается на расширение применения гидравлического, термического и комбинированных способов, а также на прохождение стадии экспериментальных исследований и промышленных испытаний электрофизических и химических способов разрушения. Дается обобщение законов Кирпичева – Кика и Риттингера, в соответствии с которыми общие энергозатраты складываются из упругопластических деформаций разрушаемого объема материала и работы, расходуемой на образование новых поверхностей. В работе [26]

рассмотрены гипотезы измельчения также с учетом пропорциональности энергии измельчения по отношению к вновь образованной поверхности и объему измельченного материала. Учитывается кинетика и длительность процесса. Известны работы, связанные с обобщением математических моделей гидродинамических и кавитационных явлений посредством электроразрядных и ультразвуковых воздействий [27, 28], влияния конструктивных особенностей вращающихся каналов типа «конфузор-диффузор» [29]. В работе [30] 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.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Анализ показал, что основными разрушающими эффектами при микродезинтеграции минеральной составляющей гидросмесей являются турбулентное резонансное возбуждение и кавитация, приводящие к деструкции дисперсно-агрегатного состояния гидросмеси и разрушению механических связей твердого. Кроме того, эти явления можно инициировать посредством технических средств, не прибегая к дополнительным затратам электроэнергии. Феноменологический подход включает два этапа математического описания процессов, в полном цикле обеспечивающих достаточную деструкцию глинистых частиц посредством турбулизации и последующей кавитации. В данной статье ограничимся рассмотрением процессов турбулизации для выбора исходных параметров регулирования процесса в начале цикла обработки гидросмеси в установке с целью обеспечения ее эффективности. При попадании струи гидросмеси на ровную поверхность, расположенную перпендикулярно падающей струе гидросмеси, давление струи на поверхность  $P$  будет зависеть от равновесной плотности гидросмеси  $\rho_3$ , расхода гидросмеси  $Q$ , скорости струи  $V$  и определится по формуле

$$P = \rho_3 \cdot Q \cdot V. \quad (1)$$



Равновесная плотность определяется с учетом объемного содержания в гидросмеси твердого и воды. Расход гидросмеси задается, а скорость струи определяется в зависимости от расхода и диаметра входного сечения сопла  $d_{\text{вх}}$  по формуле

$$V = \frac{4Q}{\pi \cdot d_{\text{вх}}^2}. \quad (2)$$

Имея предварительную схему конструктивного выполнения установки, осуществляем моделирование математической модели турбулентного эффекта, происходящего при подаче струи гидросмеси в закрытую емкость 1 (рис. 1). Турбулентность будет достигаться посредством гидродинамической составляющей струи 2 и формы поверхности 3, на которую она падает в установке на первом этапе.

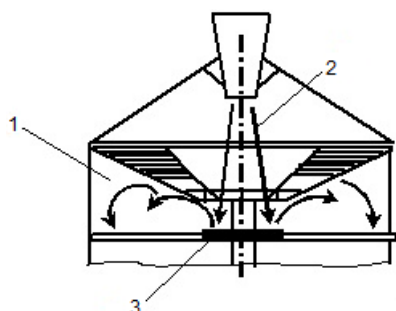


Рис. 1. Схема турбулизации струи на первой ступени генератора  
Fig. 1. Diagram of jet turbulization at generator's first stage

В рассматриваемой среде происходит изменение агрегатного состояния веществ, преимущественное количество которых находится в конденсированном состоянии и небольшое количество – в газообразном, поэтому различия между изменениями внутренней энергии частиц и изменениями энтропии системы этих частиц незначительны. Для определения параметров процесса, происходящего в кавитационном реакторе, используем зависимость, включающую оценку изменения дезинтегрируемой твердой составляющей гидросмеси. Зависимость изменения удельной межфазной поверхности вновь образованных частиц в результате турбулизации, возникшей при попадании потока гидросмеси на поверхность 3 (см. рис. 1), можно представить по аналогии [2] в виде уравнения

$$dS_{\text{уд}} = dS_{\text{уд}} \cdot e^{E \cdot \sigma^{-1}}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{уд}}$  – площадь начальной удельной межфазной поверхности частиц,  $\text{м}^{-1}$ ;  $E$  – термодинамический потенциал системы;  $\sigma$  – удельная поверхностная энергия частиц, равная  $0,0795 \text{ кг/м}^2$ .

Изменение термодинамического потенциала системы выражается зависимостью

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

где  $W$  – мощность энергии потока гидросмеси;  $\eta$  – коэффициент полезного действия установки, принимаемый за 0,5;  $t$  – время воздействия потока минеральной гидросмеси при падении на поверхность турбулизации.

Мощность энергии потока гидросмеси  $W$ , воздействующего на поверхность турбулизации (см. рис. 1, поз. 3), можно выразить через давление потока гидросмеси  $P$  и площадь поверхности турбулизации  $S_m$  прямо пропорциональной зависимостью

$$W = P \cdot S_m. \quad (5)$$

Часть струи веерообразно расходится, отражаясь затем от стенок корпуса и элементов, расположенных выше уровня поверхности (см. рис. 1, поз. 3), падает вниз, попадая на заостренные выступы вертикальных пластинчатых кавитационных элементов. Изменения удельной межфазной поверхности частиц твердого контролируются с помощью установки Analysette 22 перед подачей гидросмеси и после прохождения потока через реактор. Диапазон измеряемых частиц составляет от 0,08 до 2000 мкм. Представленные математические зависимости позволяют управлять процессом при проведении испытаний, оценить качество и характер работы установки, а также отрегулировать и внести необходимые изменения в конструкцию.

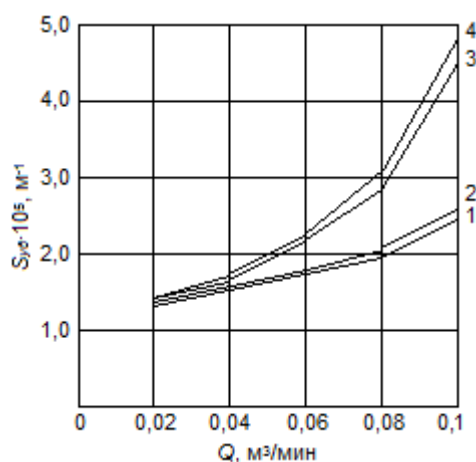
Рассмотрим пример расчета удельной межфазной поверхности минеральных частиц в результате турбулизации потока гидросмеси на первой ступени при попадании в реактор микродезинтеграции. Изменяющиеся исходные параметры: время воздействия – 2 и 4 с; при равновесной плотности гидросмеси в первом случае – 0,1 твердого и 0,9 воды, расчетная плотность гидросмеси составит величину  $1076,3 \text{ кг/м}^3$ ; во втором случае – 0,2 твердого и 0,8 воды, расчетная плотность гидросмеси –  $1152,6 \text{ кг/м}^3$ . Коэффициент полезного действия установки  $\eta$  принимаем равным 0,5.



Удельная поверхностная энергия частиц  $\sigma$  равна  $0,0795 \text{ кг/м}^2$ . Площадь поверхности турбулизации  $S_m$  при радиусе, равном  $0,1 \text{ м}$ , составит

$$S_m = \pi R^2 = 3,14 \cdot 0,1 = 0,0314 \text{ м}^2. \quad (6)$$

Исходную удельную межфазную поверхность минеральных частиц принимаем равной  $S_{0\gamma\delta} = 1,345 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ . Диаметр входного сечения сопла  $d_{\text{вх}}$  принимаем равным  $0,05 \text{ м}$ . Диапазон изменения расхода гидросмеси  $Q$  принимаем равным от  $0,02$  до  $0,1 \text{ м}^3/\text{мин}$  или от  $0,00033$  до  $0,00167 \text{ м}^3/\text{с}$ . На рис. 2 представлена зависимость удельной межфазной поверхности минеральных частиц  $S_{\gamma\delta}$  от расхода гидросмеси  $Q$ , полученная расчетом по теоретической формуле (3).



**Рис. 2. Зависимость удельной межфазной поверхности минеральных частиц от расхода гидросмеси**

**Fig. 2. Dependence of specific interfacial surface of mineral particles on hydraulic fluid flow rate**

Графики 1 и 2 (см. рис. 2) получены расчетом с исходными данными: время воздействия –  $2 \text{ с}$ , расчетная плотность гидросмеси –  $1076,3 \text{ кг/м}^3$  для графика 1 и  $1152,6 \text{ кг/м}^3$  для графика 2. Графики 3 и 4 получены при тех же данных и времени воздействия  $4 \text{ с}$ . Существенную роль играет временной фактор и содержание твердой составляющей – минеральных частиц – в жидкой фазе. Результаты теоретических расчетов показали, что при времени воздействия  $2 \text{ с}$  удельная межфазная поверхность частиц увеличивается в среднем в  $1,8$  раза в зависимости от плотности гидросмеси. При времени воздействия  $4 \text{ с}$  удельная межфазная поверхность частиц увеличивается в среднем в  $3,3$  раза в зависи-

мости от плотности гидросмеси. Определяющую роль в процессе микродезинтеграции минеральных частиц в условиях турбулизации играет рост времени воздействия с учетом термодинамического потенциала системы, зависящего от расхода гидросмеси  $Q$ , скорости струи  $V$  и давления струи на поверхность.

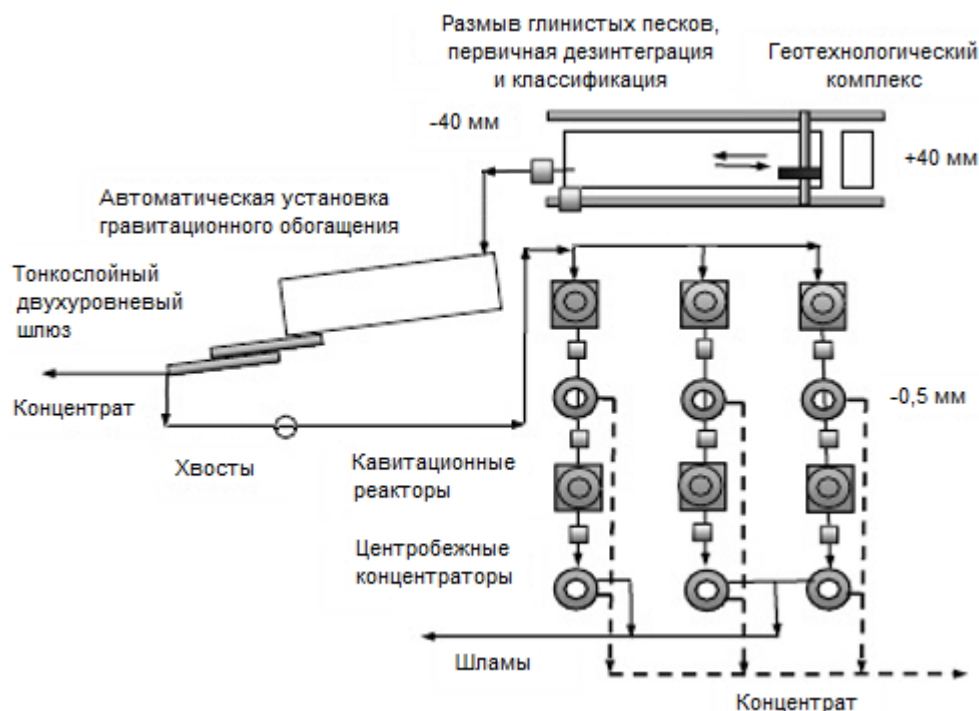
Для реализации поставленной цели рассмотрены конструктивные особенности нового технического решения, расширяющего функциональные возможности оборудования с использованием турбулизующего реактора с элементами кавитации [31]. Начальный этап работы включает компоновку элементов геотехнологического комплекса для подготовки размыва глинистых песков в забое (рис. 3, 4). Решение вопроса повышения производительности и технологической эффективности возможно за счет применения установки эстакадного типа [32] для охвата больших по площади размеров полигона.

Комплекс [32] включает средства для осуществления размыва песков, первичной дезинтеграции и классификации в массиве посредством гидромонитора и установки эстакадного типа, оснащенной двухковшовым модулем. Подготовленные глинистые пески подаются последовательно на автоматическую установку гравитационного обогащения [33] и тонкослойный двухуровневый шлюз (см. рис. 3). Автоматическая установка гравитационного обогащения [33] оснащена многоярусной улавливающей поверхностью, каждый ярус которой оснащен многорядными элементами, расширяющими общую площадь улавливания концентрата, а также датчиками контроля накопления концентрата и автоматизированным сполоском. Хвосты подаются последовательно на первую стадию микродезинтеграции посредством кавитационных реакторов [31] и затем на стадию гравитационного обогащения посредством центробежных концентраторов. При необходимости стадии микродезинтеграции и центробежного разделения фракций повторяются до полного извлечения ценных компонентов. Реактор [31] оснащен диффузором, на выходе которого жестко зафиксирован гидродинамический распределитель-турбулизатор потока 1 в виде многогранной частично перфорированной поверхности,



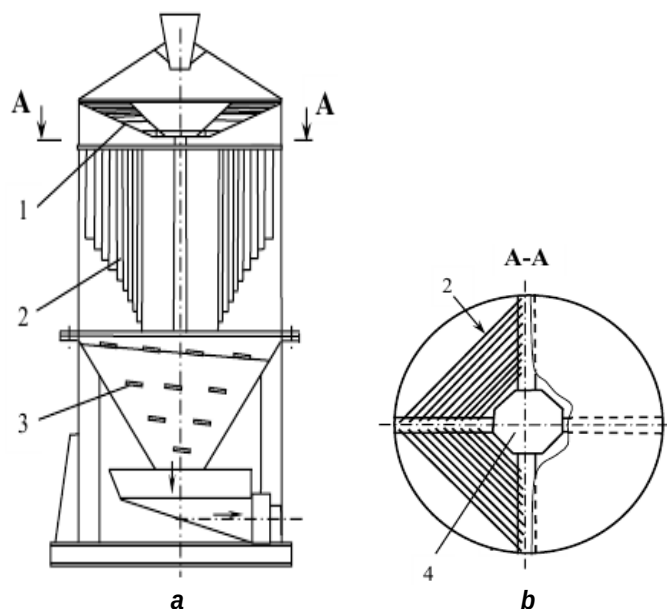
ниже основания которой установлена плоская поверхность 4 крестовины для турбулизации и кавитационные элементы 2. Через распределитель-турбулизатор 1 поток подается на

плоскую поверхность 4 крестовины и распределяется в промежутках вдоль поверхностей вертикальных пластинчатых кавитационных элементов 2 (см. рис. 4).



**Рис. 3. Схема работы геотехнологического комплекса**

**Fig. 3. Operation scheme of a geotechnological complex**



**Рис. 4. Кавитационный реактор для микродезинтеграции:**

*a* – общий вид реактора; *b* – разрез А-А на фигуре (а),

*вид сверху на вертикальные пластинчатые кавитационные элементы*

*1* – распределитель-турбулизатор потока; *2* – вертикальные пластинчатые кавитационные элементы;

*3* – кавитационные порошки установлены по спирали в зоне конфузора; *4* – плоская поверхность турбулизации

**Fig. 4. Cavitation reactor for microdesintegration:**

*a* – general view of reactor; *b* – A-A section on the figure (a), top view of vertical plate cavitation elements

*1* – flow distributor and turbulizer; *2* – vertical plate cavitation elements;

*3* – cavitation horns installed in a spiral in the confusor zone; *4* – flat turbulization surface



Известные широко применяемые технологии имеют коэффициент извлечения ценных компонентов 0,6–0,75, предлагаемая же технология существенно влияет на извлечение мелких фракций ценных компонентов и обеспечивает коэффициент извлечения до 0,85. По укрупненным оценкам экономическая эффективность предлагаемой технологии по сравнению с известными технологиями на основе гравитационных методов извлечения ценных компонентов эффективнее в 3–5 раз. Использование установок, работа которых основана на новом принципе формирования турбулизации и кавитационных явлений в гидротоке, обеспечит эффективное разрушение минеральной составляющей при низкой энергоемкости, которая определяется отсутствием вращающихся элементов внутри корпуса кавитационных реакторов. Установка обеспечит и высокую экологическую эффективность путем снижения использования токсичных растворов для выщелачивания.

### Заключение

На основе предложенной экспоненциальной зависимости изменения удельной межфазной поверхности минеральных частиц от

термодинамического потенциала системы установлено, что определяющее влияние в процессе микродезинтеграции минеральных частиц в условиях турбулизации, инициируемой падающей струей на плоскую поверхность кавитационного реактора, имеет взаимозависимость скорости истечения и расхода гидросмеси в условиях увеличения времени воздействия. В результате расчетов установлен рост удельной межфазной поверхности частиц в среднем от 1,8 до 3,3 раза в зависимости от регулирования расхода гидросмеси, плотности гидросмеси и времени воздействия. Представленные математические зависимости позволяют управлять процессом при проведении испытаний кавитационного реактора, оценить качество и характер работы установки, а также отрегулировать и внести необходимые изменения в конструкцию. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для дальнейшего развития теоретических подходов к описанию кавитационных процессов, моделируемых в предлагаемых установках, новизна которых подтверждена патентами [2, 31–33]. Данные исследования требуют также и своего развития.

### Список источников

1. Неронский Г. И., Бородавкин С. И. Метод оценки содержаний золота в россыпях с доминирующими мелкими и тонкими его выделениями // Золотодобыча: рекламно-информационный бюллетень. 2012. № 1. С. 21–24.
2. Хрунина Н. П., Стратечук О. В. Новые аспекты научных и технологических основ гидродинамической микродезинтеграции при освоении высокоглинистых золотосодержащих месторождений Дальневосточного региона / под ред. А. М. Пуляевского. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2018. 155 с.
3. Маньков В. М., Сержанин П. В. Разработка и испытание способа и аппарата для эффективной дезинтеграции и классификации валунистых глинистых руд и песков // Золотодобыча: рекламно-информационный бюллетень. 2019. № 11. С. 18–20.
4. Кисляков В. Е., Никитин А. В. Подготовка глинистых песков россыпных месторождений к дезинтеграции управляемым водонасыщением // Горный журнал. 2010. № 2. С. 28–30.
5. Ёлшин В. В., Мельник С. А. Современное состояние и перспективы развития технологии десорбции золота из насыщенных активированных углей // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2014. Iss. 9-10. P. 114–118.
6. Рукович А. В., Рочев В. Ф. Дезинтеграция мерзлых глинистых пород под воздействием химических полей и водной среды // Успехи современного естествознания. 2017. № 5. С. 123–127.
7. 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>.
8. Surimbayev B., Bolotova L., Mishra B., Baikonurova A. Intensive cyanidation of gold from gravity concentrates in a drum-type apparatus // Қазақстан Республикасы Ұлттық академиясының Хабарлары. Геология және техника ғылымы сериясы. 2018. № 5. С. 32–37. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.7>.
9. Крупская Л. Т., Мамаев Ю. А., Хрунина Н. П., Литвинцев В. С., Пономарчук Г. П. Экологические основы рационального землепользования при освоении россыпных месторождений Дальнего Востока. Владивосток – Хабаровск: Дальнаука, 1997. 76 с.
10. Патент № 2187373, Российская Федерация, МПК В03В5/74 В03В5/04. Многоуровневая установка для извлечения ценных минералов / Н. П. Хрунина,



Ю. А. Мамаев, О. В. Стратечук, Т. О. Хрунин. Заявл. 30.01.2001; опубл. 20.08.2002.

11. Златев М., Коломиетц А. Hydro-Clean: извлекать больше золота из упорных руд возможно // Глобус. 2021. № 1. С. 170–179.

12. Кочнев В. Г., Грушинская О. В. Дезинтеграция труднопромывистых песков с высокопластичной глиной // Золотодобыча: рекламно-информационный бюллетень. 2021. № 2. С. 22–26.

13. Чантурия В. А., Бунин И. Ж. Нетрадиционные высокэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2007. № 3. С. 107–128.

14. 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.

15. Coulter T., Subasinghe G. K. N. A mechanistic approach to modelling Knelson concentrators // Minerals Engineering. 2005. Vol. 18. Iss. 1. P. 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.035>.

16. 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>.

17. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: part 1: retained mass modelling // Minerals Engineering. 2017. Vol. 112. P. 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.07.006>.

18. Noaparast M., Laplante A. R. Free gold particles selection and breakage functions estimation // Iranian Journal of Science and Technology. Transaction B: Engineering. 2004. Vol. 28. Iss. 6. P. 667–677.

19. Fullam M., Watson B., Laplante A., Gray S. Advances in gravity gold technology // Gold ore processing: project development and operations / ed. M. D. Adams. Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 301–314.

20. Laplante A., Gray S. Advances in gravity gold technology // Developments in Mineral Processing. 2005. Vol. 15. P. 280–307. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15013-3](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15013-3).

21. Koppalkar S., Bouajila A., Gagnon C., Noel G. Understanding the discrepancy between prediction and plant GRG recovery for improving the gold gravity performance // Minerals Engineering. 2011. Vol. 24. Iss. 6. P. 559–564. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.007>.

22. Laplante A. R. A standardized test to determine gravity recoverable gold. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/10/Test-Determine-How-Much-Gravity-Recoverable-Gold.pdf>. (16.05.2021).

23. Laplante A. R., Dunne R. C. The Gravity recoverable gold test and flash flotation // Proceeding 34<sup>th</sup> Annual

Meeting of the Canadian Mineral Processors. Ottawa, 2002. [Электронный ресурс]. URL: <http://seprosystems.com/language/wp-content/uploads/2016/09/laplante.pdf>. (16.05.2021).

24. Уракаев Ф. Х., Шумская Л. Г., Кириллова Е. А., Кондратьев С. А. Возможности стадийной дезинтеграции и механической активации в процессах обогащения техногенного оловосодержащего сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 3. С. 158–167. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210315>.

25. Лабутин В. Н., Маттис А. Р., Зайцев Г. Д., Ческидов В. И. Безвзрывная технология добычи полезных ископаемых: состояние и перспективы. Ч. II. Оценка эффективности применения различных способов разрушения в технологиях открытых горных работ // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2004. № 2. С. 66–75.

26. Клыков Ю. Г., Гуриев Т. С. Определение зависимости влияния параметров гранулометрического состава измельченного материала на энергетические параметры дезинтеграции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 1. С. 34–38.

27. Матвеев И. А., Матвеев А. И., Еремеева Н. Г., Филиппов В. Е. Модель движения частиц в восходящем потоке по искривленной поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 10. С. 179–182.

28. Крутиков В. С., Лопатнев А. Г. Особенности гидродинамических характеристик импульсных процессов в сжимаемой среде при многократном (пульсирующем) законе ввода энергии // Письма в журнал технической физики. 1999. Т. 25. № 14. С. 34–41.

29. Хайруллин М. Р., Золотоносов Я. Д. Сопряженная задача теплообмена при течении степенной жидкости во вращающемся канале «конфузор-диффузор» овального сечения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 1. С. 94–102.

30. Аникин В. С., Аникин В. В. Моделирование гидродинамических вихревых потоков с ультразвуковыми кавитационными процессами // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2008. № 2. С. 61–66.

31. Патент № 2646270, Российская Федерация, МПК В03В 5/00. Способ инициирования кавитационно-гидродинамической микродезинтеграции минеральной составляющей гидросмеси / Н. П. Хрунина. Заявл. 12.04.2017; опубл. 02.03.2018.

32. Патент № 2327039, Российская Федерация, МПК Е21С 41/30, В03В 5/02. Способ разработки россыпей и технологический комплекс для его осуществления / В. С. Литвинцев, Н. П. Хрунина, Ю. А. Мамаев, В. С. Алексеев. Заявл. 25.12.2006; опубл. 20.06.2008.

33. Патент № 1559503, Российская Федерация, МПК В03В 5/70. Установка для обогащения песков россыпей / Ю. А. Мамаев, Н. П. Хрунина. Заявл. 10.10.1988; опубл. 10.11.1996.



## References

1. Neronskii G. I., Borodavkin S. I. Estimation method of gold contents in placers with dominant small and thin gold secretions. *Zolotodobycha: reklamno-informatsionnyi byulleten'*. 2012;1:21-24. (In Russ.).
2. Khrunina N. P., Stratechuk O. V. New aspects of scientific and technological foundations of hydrodynamic microdesintegration in the development of high-clay gold-bearing deposits of the Far Eastern region. Khabarovsk: Pacific National University; 2018. 155 p. (In Russ.).
3. Man'kov V. M., Serzhanin P. V. Development and testing of a method and device for effective disintegration and classification of boulder clay ores and sands. *Zolotodobycha: reklamno-informatsionnyi byulleten'*. 2019;11:18-20. (In Russ.).
4. Kislyakov V. E., Nikitin A. V. Preparation of loam sand of placer deposits to scrubbing by observation water saturation. *Gornyi zhurnal*. 2010;2:28-30. (In Russ.).
5. 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.).
6. Rukovich A. V., Rochev V. F. Disintegration of frozen clay rocks under the influence of chemical fields and the aquatic environment. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*. 2017;5:123-127. (In Russ.).
7. 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>.
8. Surimbayev B., Bolotova L., Mishra B., Baikonurova A. Intensive cyanidation of gold from gravity concentrates in a drum-type apparatus. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Respubliki Kazakhstan. Seriya geologii i tekhnicheskikh nauk = News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2018;5:32-37. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.7>.
9. Krupskaya L. T., Mamaev Yu. A., Khrunina N. P., Litvintsev V. S., Ponomarchuk G. P. Ecological bases of rational land management under placer development in the Far East. Vladivostok – Khabarovsk: Dal'nauka; 1997. 76 p. (In Russ.).
10. Khrunina N. P., Mamaev Ju. A., Stratechuk O. V., Khrunin T. O. *Multilevel plant for recovery of valuable minerals*. Patent RF, no. 2187373; 2002. (In Russ.).
11. Zlatev M., Kolomietts A. Hydro-Clean: it is possible to extract more gold from refractory ores. *Globus*. 2021;1:170-179. (In Russ.).
12. Kochnev V. G., Grushinskaya O. V. Disintegration of hard-to-wash sands with high-plastic clay. *Zolotodobycha: reklamno-informatsionnyi byulleten'*. 2021;2:22-26. (In Russ.).
13. Chanturiya V. A., Bunin I. Zh. Unconventional high-energy methods of disintegration and opening of fine mineral complexes. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2007;3:107-128. (In Russ.).
14. 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-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2009;7:187-191. (In Russ.).
15. Coulter T., Subasinghe G. K. N. A mechanistic approach to modelling Knelson concentrators. *Minerals Engineering*. 2005;18(1):9-17. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.035>.
16. 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>.
17. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: part 1: retained mass modelling. *Minerals Engineering*. 2017;112:57-67. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.07.006>.
18. Noaparast M., Laplante A. R. Free gold particles selection and breakage functions estimation. *Iranian Journal of Science and Technology. Transaction B: Engineering*. 2004;28(6):667-677.
19. Fullam M., Watson B., Laplante A., Gray S. Advances in gravity gold technology. In: Adams M. D. (ed.). *Gold ore processing: project development and operations*. Amsterdam: Elsevier; 2016. p.301–314.
20. Laplante A., Gray S. Advances in gravity gold technology. *Developments in Mineral Processing*. 2005;15:280-307. [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15013-3](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15013-3).
21. Koppalkar S., Bouajila A., Gagnon C., Noel G. Understanding the discrepancy between prediction and plant GRG recovery for improving the gold gravity performance. *Minerals Engineering*. 2011;24(6):559-564. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.09.007>.
22. Laplante A. R. A standardized test to determine gravity recoverable gold. Available from: <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/10/Test-Determine-How-Much-Gravity-Recoverable-Gold.pdf>. [Accessed 16<sup>th</sup> May 2021].
23. Laplante A. R., Dunne R. C. The Gravity recoverable gold test and flash flotation. In: *Proceeding 34<sup>th</sup> Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*. Ottawa; 2002. Available from: <http://seprosystems.com/language/wp-content/uploads/2016/09/laplante.pdf>. [Accessed 16<sup>th</sup> May 2021].
24. Urakaev F. Kh., Shumskaya L. G., Kirillova E. A., Kondrat'ev S. A. Stageswise disintegration and mechanical activation in dressing of tin-bearing waste. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2021;3:158-167. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210315>. (In Russ.).
25. Labutin V. N., Mattis A. R., Zaitsev G. D., Cheskidov V. I. Blast-free technology of mineral mining: state and prospects. Part II. Estimation of the efficiency of various failure methods in opencast mining technologies. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2004;2:66-75. (In Russ.).



26. Klykov Yu. G., Guriev T. S. Effect of grain size composition of ground material on energy parameters of the material disintegration. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014;1:34-38. (In Russ.).

27. Matveev I. A., Matveev A. I., Yeremeyeva N. G., Filippov V. E. Model of particle motion in upstream along the curved surface. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014;10:179-182. (In Russ.).

28. Krutikov V. S., Lopatnev A. G. Features of hydrodynamic characteristics of pulse processes in a compressible medium under multiple (pulsating) law of energy input. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1999;25(14):34-41. (In Russ.).

29. Khairullin M. R., Zolotonosov Ya. D. Conjugate heat transfer problem in the flow of power-law fluid in the rotating "confuser-diffuser" channel with oval section.

*Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2012;1:94-102. (In Russ.).

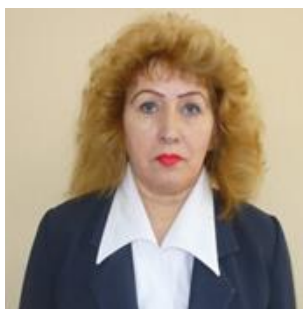
30. Anikin V. S., Anikin V. V. Modelling of hydrodynamical vortical streams with ultrasonic cavitation processes. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 2008;2:61-66. (In Russ.).

31. Khrunina N. P. Method of initiation of the cavitation-hydrodynamic microdisintegration of the mineral composition of hydrosol. Patent RF, no. 2646270; 2018. (In Russ.).

32. Litvintsev V. S., Khrunina N. P., Mamaev J. A., Alekseev V. S. Excavation method of alluvial deposits and technological complex for its fulfillment. Patent RF, no. 2327039; 2008. (In Russ.).

33. Mamaev Ju. A., Khrunina N. P. Unit for enriching placer sands. Patent RF, no. 1559503; 1996. (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,  
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 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 выполнила исследовательскую работу, на основании полученных результатов провела обобщение, подготовила 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 04.06.2021; одобрена после рецензирования 14.07.2021; принята к публикации 18.08.2021.

The article was submitted 04.06.2021; approved after reviewing 14.07.2021; accepted for publication 18.08.2021.