

УДК 622.75  
 DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-7-84-90

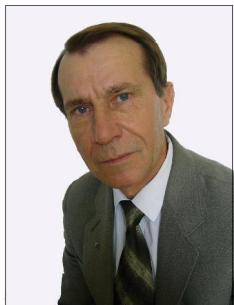
## ФОРМИРОВАНИЕ ДВОЙНОГО ТОНКОСЛОЙНОГО ЭФФЕКТА В АППАРАТАХ ПРОТОЧНОГО ТИПА ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ПОЛИМИНЕРАЛЬНОЙ ГИДРОСМЕСИ

### THE FORMATION OF THE DOUBLE THIN-LAYER EFFECT IN THE FLOW TYPE APPARATUS FOR THE ENRICHMENT OF COMPOUND SLURRY



**А. Н. Хатькова,**  
 Забайкальский государственный  
 университет, г. Чита  
 alisa1965.65@mail.ru

**A. Khatkova,**  
 Transbaikal State University, Chita



**В. Г. Черкасов,**  
 Забайкальский государственный  
 университет, г. Чита  
 cherkasov1948@yandex.ru

**V. Cherkasov,**  
 Transbaikal State University, Chita

Рассматривается физический процесс разделения полиминеральной гидровзвеси в тонкослойном пространстве на твёрдую и жидкую фазы с выделением ценного компонента. Приводится вариант аппаратурного оформления системы водоподготовки, обеспечивающий защиту естественных водотоков от загрязнения с дополнительным извлечением мелких и тонких фракций тяжёлых частиц. Показано новое конструктивное решение по созданию аппаратов с расширенным функциональным назначением. В основе их действия лежит энергосберегающий принцип на базе двойного тонкослойного эффекта. Приводятся техническая характеристика, показатели разделительной способности, оценка обогатительных свойств и причины, вызывающие повышенную эффективность конструкции применительно к переработке полиминеральных гидросмесей при промывке металлоносных песков на россыпных месторождениях. Рассматриваются новые технические решения, формирующие двойной тонкослойный эффект разделения двухфазной гидровзвеси с целью расширения функциональных возможностей при промывке металлоносных песков

**Ключевые слова:** полиминеральная гидросмесь; тонкослойное пространство; твёрдая и жидккая фазы; стратифицированный поток; двойной эффект; осадочный слой; аппараты; фракция; режим; промывка металлоносных песков

The article deals with the physical process of separation of polymimetallic hydro suspension in a thin-layer space into solid and liquid phases with the release of a valuable component. A variant of the hardware design of the water treatment system, which provides protection of natural streams from pollution with additional extraction of fine and fine fractions of heavy particles, is presented. The new constructive decision on creation of devices with the expanded functional purpose is shown. Their action is based on the energy-saving principle based on the double current-layer effect. The technical characteristics, indicators of the separation of powers, evaluation and processing properties and the causes of the increased efficiency of design in relation to the processing polymimetal slurry when flushing than metal-bearing sands of alluvial are described. New technical solutions are considered, forming the dual thin layer separating the effects of two-phase hydro-slurry with the aim of expanding functionality by washing metalliferous sands

**Key words:** polymimetal slurry; thin space; solid and liquid phases; stratified flow; double effect; sediment; vehicles; faction; mode; flushing metalliferous sands

Гидромеханизированная переработка минерального сырья на россыпных месторождениях базируется на водоёмких операциях с формированием огромных (до

1000...2000 м<sup>3</sup>/ч) массопотоков полиминеральной гидросмеси. Несовершенство технологического оборудования приводит к значительным (до 45...50 %) безвозвратным

потерям тонких фракций ценного компонента [1; 4]. Низкая улавливающая способность наиболее распространённых аппаратов проточного типа (шлюзы, желоба, концентрационные столы, осадочные машины и т. д.) определяется гидродинамическим режимом. Возникающая турбулентность массопотока в зоне разделения при транспортировании полиминеральной гидровзвеси подавляет основной разделительный фактор для мелких и тонких классов тяжёлых частиц – гравитационную составляющую. Ламинарный режим в этих случаях более благоприятен, но приводит к снижению пропускной способности аппарата или к увеличению его габаритов и массы.

Рациональная совместимость увеличения пропускной способности и снижения габаритов, массы при сохранении ламинарного режима в рабочей зоне аппарата достигается при прохождении гидросмесью многоярусного тонкослойного пространства [2; 7]. В зависимости от назначения такие конструкции имеют различные названия. В дальнейшем принят общий термин – тонкослойные аппараты (ТА).

При кардинальном изменении типовой конструкции подобных аппаратов [5; 6; 9] появляется возможность формировать двойной тонкослойный эффект и расширять функциональные возможности ТА, дополнительно придавая обогатительную функцию. Первый эффект проявляется с ускоренным переходом твёрдой фазы гидросмеси на стенки каналов рабочей полости при ламинарном режиме потока. В этом случае в качестве разделительной области выступает тонкослойное пространство аппарата. Второй эффект возникает при транспортировании аккумулированной твёрдой фазы вдоль продольно вытянутого днища оболочки аппарата. Такой подход обеспечивает дополнительную степень свободы по формированию и транспортировке осадочного продукта в пространстве и во времени. V-образная форма канала (рис. 1) локализует осадок и увеличивает его высоту, при этом в процессе его продольного перемещения возникает сегрегация частиц по плотности.

Такое перераспределение двухфазной среды даёт возможность накладывать на разделительный процесс дополнительные функциональные связи.

Для полиминеральной гидровзвеси продольное перемещение сгущённого осад-

очного слоя с ламинарным режимом вдоль V-образного канала в придонной зоне формирует процесс сегрегации твёрдой фазы. При этом тяжёлая фракция переходит в нижнюю часть стратифицированного потока. Улавливающие карманы или трафареты, расположенные внутри гофрированного канала, позволяют отсекать и дифференцированно (по плотности частиц) выводить тяжёлую фракцию наружу [8]. Возможности этого решения не ограничены разделением гидровзвеси (супензий), но и благоприятны для разделения эмульсий с выводом, например, нефтепродуктов. В этом случае меняется расположение улавливающих элементов – с нижнего положения оболочки на её верхнюю часть.

Если известные конфигурации ТА используют при эксплуатации как осветлители жидкой или сгустители твёрдой фазы, и они предназначены для выделения твёрдой фазы в целом, то предложенный вариант формы тонкослойного пространства (патенты РФ № 2385771, 2222382, 1692028, 2248848) расширяет возможности ТА, придавая таким устройствам обогатительные функции [6].

Локализация тонкодисперсной твёрдой фазы в канале днища ТА создаёт прямую механическую стратификацию (плотностное расслоение) [3]. При этом скачок плотности квазижидкой среды с глубиной увеличивается (рис. 1б). В результате пульсационное перемещение тяжёлых частиц вверх, вызванное действием турбулентности, тормозится силой тяжести, и энергия турбулентности переходит в потенциальную энергию положения. Подобный процесс стабилизации энергии турбулентности происходит при перемещении лёгкой частицы вниз, в среду с большей плотностью, то есть прямая стратификация гасит турбулентность твёрдой фазы в потоке, что даёт основания рассматривать движение двух неоднородных по плотности жидкостей по двухслойной схеме.

Из известных критериев устойчивости потока в теории стратифицированных течений для оценки тонкослойного процесса наиболее приемлем комплекс  $F$  [5] на основе плотностных чисел Рейнольдса и Фруда. Для осадочного слоя этот комплекс определяется как

$$F = \text{Re}_\delta F_\delta^2 = \frac{\Delta V \delta_o}{\rho_1 v_1 + \rho_0 v_0} g \frac{(\Delta V)^2}{\frac{\Delta \rho}{\rho_1 + \rho_0} \delta_o} \leq F_{kpi}, \quad (1)$$

где  $Re_\delta$  и  $Fr_\delta$  – числа Рейнольдса и Фруда соответственно в нижней области канала;

$\Delta V = (U_{cp} - V_{cp})$  – разность скорости между потоками;

$\delta_\delta$  – толщина пограничного слоя раздела;

$\nu_\vartheta \rho_\vartheta \rho_p v_i$  – соответственно плотность рассматриваемых слоёв и их кинематические коэффициенты вязкости;

$\Delta\rho$  – разность плотностей;

$\rho$  – осреднённая плотность рассматриваемого слоя;

$F_{kpi}$  – показатель устойчивости  $i$ -го состояния.

В этом случае основным параметром выступает скорость осадочного слоя –  $U_{cp}$ . Рассматривая нижний слой как структурную вязкопластичную систему, на основе зако-

на Шведова – Бингама установлена зависимость для определения средней скорости осадка

$$U_{cp} = \frac{h^2 g c_{oc} (\rho - \rho_{oc}) (\sin \alpha - f_3 \cos \alpha)}{8 \mu_{oc}} \mu V_{cp}, \quad (2)$$

где  $h$  – средняя высота слоя;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ;

$\rho$  и  $\rho_x$  – плотность твёрдых частиц и жидкой фазы, соответственно;

$\mu_{oc}$  – коэффициент динамической вязкости осадочного слоя;

$V_{cp}$  – скорость исходной гидровзвеси;

$f_3$  – коэффициент трения, определённый через средний угол трения при переходе осадка из статического состояния в динамическое и наоборот.

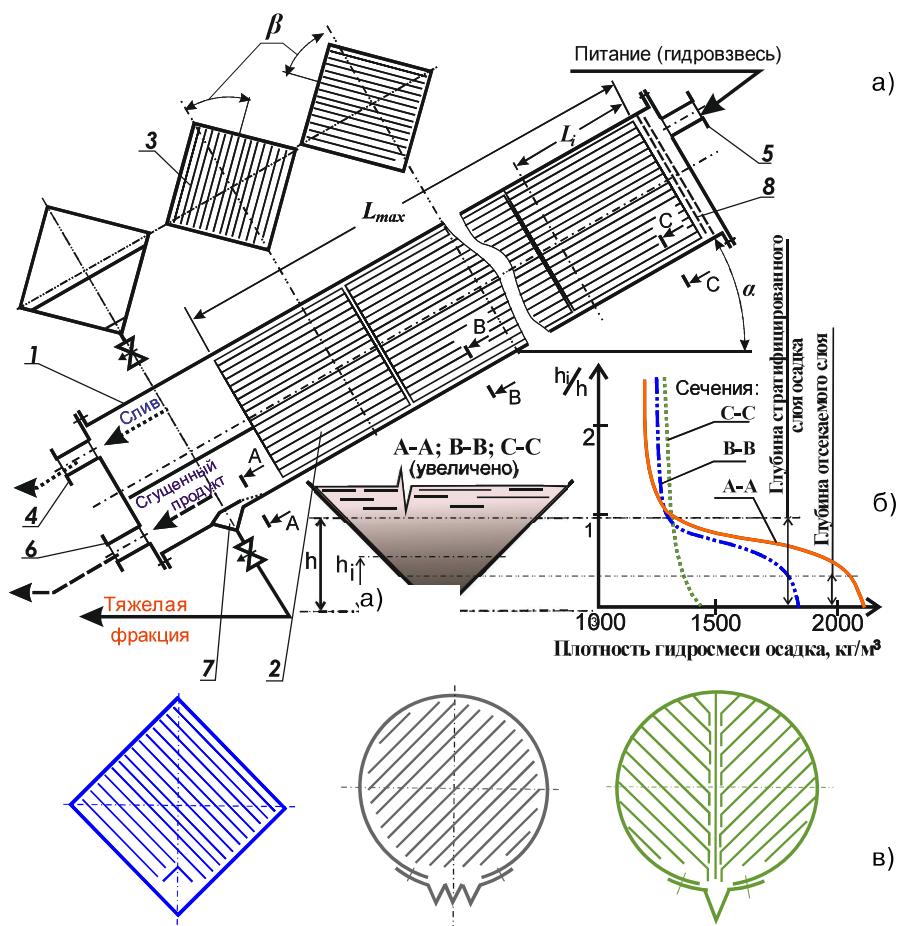


Рис. 1. Схема тонкослойного аппарата (а), график изменения плотности локализованного слоя осадка по его глубине (б) и варианты исполнения тонкослойного пространства по поперечному сечению (в):

- 1 – оболочка аппарата; 2 – тонкослойные элементы; 3 – каналы; 4 – патрубок слива; 5 – патрубок питания; 6 – патрубок выхода сгущённого продукта; 7 – отсекающий карман тяжёлой фракции; 8 – распределитель потока / Fig. 1. Diagram of thin-layer apparatus (a), schedule changes in the density of localized sediment layer at depth (b), and embodiments of the thin space over the cross section (c): 1 – the casing of the device; 2 – thin-layer elements; 3 – channels; 4 – drain; 5 – outlet power supply; 6 – nozzle output underflow; 7 – shut-off pocket of the heavy fraction; 8 – flow divider

Для различных покрытий канала и состава гидросмесей опытным путём на прозрачной физической модели определены значения  $f_g$ , которые находятся в интервале 0,83...0,97. А значения объёмного содержания твёрдой фазы в исходном питании для песчано-глинистого слоя аппроксимированы в зависимости  $c_{oc} = 0,16 + 51 h$  где  $0 < h < 0,02$  м. Погрешность опытных значений с расчётными по зависимости (2) не превышает 12 %.

Так же физическим моделированием (рис. 2) установлено, что при  $F_{kp,1} < 120$  потоки имеют ламинарный режим, при этом разность средних скоростей исходного питания и слоя осадка составляет  $\Delta V = (U_{cp} - V_{cp}) < 0,04$  м/с; при  $120 < F_{kp,2} < 500$  и  $0,04 < \Delta V < 0,06$  наблюдается устойчивое возмущение осадочного слоя; при  $500 < F_{kp,3} < 1200$  и  $0,06 < \Delta V < 0,08$  происходит распад стратифицированного течения, а при значениях  $F_{kp,4} > 1200$  и  $\Delta V > 0,08$  м/с наступает турбулентное течение в тонкослойном пространстве в V-образном канале.

Исследование показывает, что высокая эффективность процесса разделения двухфазной среды с выводом твёрдой фазы из рабочего пространства, который проходит с минимальным значением  $\Delta V$ . При этом для стратифицированного потока значения комплексного показателя устойчивости должно соответствовать  $F < 100$ . Анализ полученных значений  $F$  для разделительного процесса в конструкциях ТА с аналогичными процессами, рассматриваемыми в гидрологии, океанологии, химии, метеорологии показывает, что значения показателя  $F$  в тонкослойных

элементах находятся в том же режимном диапазоне. Учитывая, что колебания геометрических и кинематических параметров каналов ТА и режимов их работы достаточно ограничены по сравнению с аналогами на максимальном уровне, полученные значения критерия  $F$  можно принять за основу при оценке устойчивости процесса механической стратификации в тонкослойных элементах при проектировании разделительных аппаратов подобного типа.

Оценка обогатительных свойств предлагаемой конструкции по выделению тяжёлой фракции из полиминеральной гидросмеси проводилась на прозрачной физической модели с использованием искусственно приготовленных гидросмесей. В качестве исходного питания применялась песчано-глинистая смесь (класса – 71 мкм) с добавлением магнетита того же класса (тяжёлая фракция) с долей 9,1 % от общей твёрдой массы. Пробы отбирались по длине ТА и высоте осадка в V-образном канале днища модели (рис. 2). Если на входе в ТА содержание тяжёлой, лёгкой фракции и жидкой фазы составляло в соотношении по массе 1:10:100, то на выходе из аппарата это соотношение достигало 1:2:10. Объём отводимого потока не превышал 11,7 % от исходного питания, а уровень концентрации тяжёлых частиц в твёрдой фазе, отводимой из V-образного канала, пре-восходил в 3,7 раза исходное содержание. Эффективность обогатительного процесса по формуле Луйкена–Хенкока составила 79,1 %.

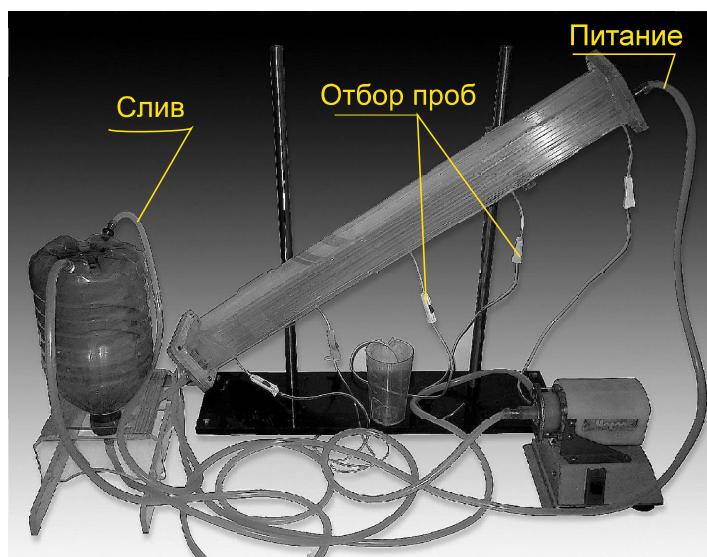


Рис. 2. Опытная модель тонкослойного аппарата / Fig. 2. Experimental model of thin-layer apparatus

Качественно-количественные изменения состава двухфазной гидросмеси, пропущенной через тонкослойное пространство, представлены на рис. 3. Такая деформация осадочного слоя вызвана следующими причинами:

- ламинарным режимом потока в тонкослойном пространстве;
- прямоточной схемой перемещения стратифицированных потоков двухфазной среды;
- селективностью твёрдой фазы в пространстве и во времени (начальный эффект тонкослойного пространства);
- сегрегацией частиц осадочного слоя во взвешенном состоянии при перемещении

его вдоль V-образного канала (конечный эффект).

Скорость перемещения осадка в гофрированном канале с  $0,08\ldots0,09 \text{ м/с}$  до  $0,01 \text{ м/с}$  возможно регулировать углом наклона оболочки аппарата относительно горизонта с  $50^\circ$  до  $40^\circ$ . Снижение скорости транспортирования твёрдой фазы в осадочном слое существенно влияет на его высоту, что позволяет в свою очередь повысить эффективность процесса сегрегации частиц. Увеличить высоту осадка возможно и конструктивным путём за счёт создания рациональной формы канала вдоль днища оболочки (см. рис. 1в).

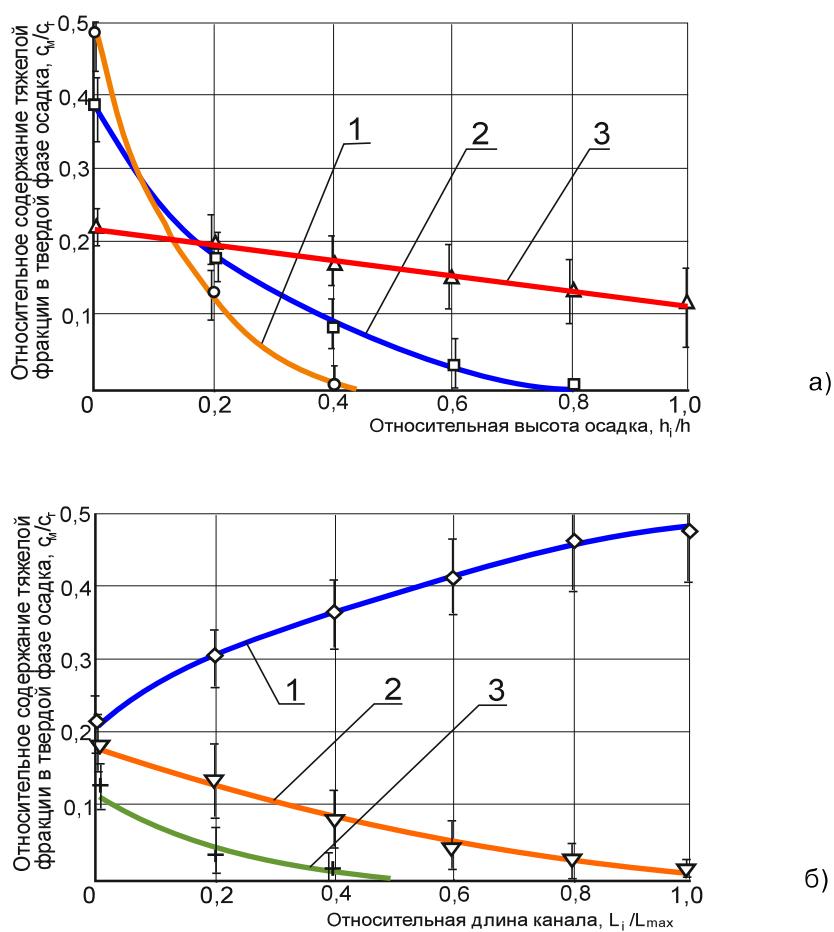


Рис. 3. Изменение содержания тяжёлой фракции (магнетит –  $4950 \text{ кг}/\text{м}^3$ , исходная концентрация –  $10 \text{ г}/\text{дм}^3$ ): а) по глубине локализованного песчано-глинистого осадка ( $2600 \text{ кг}/\text{м}^3$ , исходная концентрация –  $100 \text{ г}/\text{дм}^3$ ): 1 – в конце канала на выходе из ТА; 2 – в средней части; 3 – в начале канала, что соответствует сечениям А-А, В-В, С-С на рис. 1; б) по длине канала: 1 – нижний слой осадка,  $h/h=0$ ; 2 – средний слой,  $h/h=0,5$ ; 3 – верхний слой осадка,  $h/h=1$  / Fig. 3. The change in the content of the heavy fraction (magnetite –  $4950 \text{ kg}/\text{m}^3$ , initial concentration –  $10 \text{ g}/\text{dm}^3$ ) a) the depth of the localized sand-clay sediment ( $2600 \text{ kg}/\text{m}^3$ , initial concentration  $100 \text{ g}/\text{dm}^3$ ), where: 1 – at the end of the channel at the outlet of TA; 2 – in the middle part; 3 - at the beginning of the channel, which corresponds to the sections A-A, B-B, C-C in Fig. 1; b) the length of the channel, where: 1 – bottom layer of sludge,  $h/h=0$ ; 2 – the middle layer,  $h/h=0,5$ ; 3 – the top layer of sediment,  $h/h=1$

Следовательно, использование нового аппаратурного оформления тонкослойной конструкции с двойным тонкослойным эффектом в сепараторах проточного типа позволяет расширить их функциональные возможности. При этом решить одновременно две

задачи: первая – выделять твёрдую фазу из гидровзвеси, используя аппарат как сгуститель или осветлитель; вторая – обогащать тонкодисперсное полиминеральное сырьё при промывке металлоносных песков, которое ранее безвозвратно уходило в хвосты.

### Список литературы

---

1. Афанасенко С. И., Лазарида А. Н. Золотая жила техногенных отвалов // Золотодобыча. URL: <https://www.zolotodb.ru/articles/technical/10167> (дата обращения: 05.07.2019). Текст: электронный.
2. Бауман А. В. Методика оценки эффективности тонкослойного сгустителя // Обогащение руд. 2015. № 2. С. 36–41.
3. Боронин С. А. Гидродинамическая устойчивость стратифицированного течения суспензии в плоском канале // Доклады академии наук. 2009. Т. 429, № 4. С. 477–480.
4. Замятин О. В. Обогащение золотосодержащих песков на шлюзах. Основные закономерности и технологические возможности процесса // Золотодобыча. URL: <https://www.zolotodb.ru/articles/technical/10789> (дата обращения: 05.06.2019). Текст: электронный.
5. Черкасов В. Г. Влияние геометрии потока гидровзвеси на процесс выделения тяжелой фракции ценного компонента при промывке металлоносных песков // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 4. С. 71–78.
6. Черкасов В. Г. Расширение функциональных возможностей тонкослойных (канальных) аппаратов в обогатительных процессах // Обогащение руд. 2017. № 5. С. 42–47.
7. Шевченко А. И. Влияние конструктивных и гидродинамических параметров тонкослойного гидравлического классификатора на эффективность разделения минеральных частиц // Науковий вісник Національного гірничого університету. 2011. № 3. С. 54–58.
8. Cherkasov V. G. Design and technological solution of forming flush combine for the development of placer mineral deposits // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2016. No. 1. P. 59–63.
9. Dichtl N. Parallelplattenabscheider in der Industrieabwasserreinigung // Wasser Abwasser Praxis. 1995. No. 4. P. 50–52.

### References

---

1. Afanasenko S. I., Lazaridi A. N. *Zolotodobycha*. (Gold mining). URL: <https://www.zolotodb.ru/articles/technical/10167> (Date of access 05.07.2019). Text: electronic.
2. Bauman A. V. *Obogashchenie rud* (Ore dressing), 2015, no. 2, pp. 36–41.
3. Boronin S. A. *Doklady akademii nauk* (Reports of the Academy of Sciences), 2009, vol. 429, no. 4, pp. 477–480.
4. Zamyatin O. V. *Zolotodobycha*. (Gold mining). URL: <https://www.zolotodb.ru/articles/technical/10789> (Date of access: 05.06.2019). Text: electronic.
5. Cherkasov V. G. *Bulletin of the Transbaikal State University* (Transbaikal State University Journal), 2015, no. 4, pp. 71–78.
6. Cherkasov V. G. *Obogashchenie rud* (Ore dressing), 2017, no. 5, pp. 42–47.
7. Shevchenko A. I. *Naukoviy visnik Natsionalnogo girnichogo universitetu* (Science News of the National Hospital University), 2011, no. 3, pp. 54–58.
8. Cherkasov V. G. *Journal of Advanced Research in Technical Science* (Journal of Advanced Research in Technical Science), 2016, no. 1, pp. 59–63.
9. Dichtl N. *Wasser Abwasser Praxis* (Wasser Abwasser Praxis), 1995, no. 4, pp. 50–52.

### Коротко об авторах

---

Хатькова Алиса Николаевна, д-р техн. наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: минералого-технологическая оценка неметаллических полезных ископаемых, методы обогащения и разработки современных технологий переработки нетрадиционных видов минерального сырья  
alisa1965.65@mail.ru

Черкасов Валерий Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: машины и аппараты горно-обогатительного производства  
cherkasov1948@yandex.ru

**Briefly about the authors**

---

Alisa Khatkova, doctor of technical sciences, professor, Chemistry department, Vice-Rector for Scientific and Innovative Work, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: mineralogical and technological evaluation of non-metallic minerals, methods of enrichment and development of modern technologies for processing non-traditional types of mineral raw materials

Valery Cherkasov, doctor of technical sciences, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: mining and processing machinery and equipment

**Образец цитирования**

---

Хатькова А. Н., Черкасов В. Г. Формирование двойного тонкослойного эффекта в аппаратах проточного типа при обогащении полиминеральной гидросмеси // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25. № 7. С. 84–90. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-7-84-90.

Khatkova A., Cherkasov V. The formation of the double thin-layer effect in the flow type apparatus for the enrichment of compound slurry // Transbaikal State University Journal, 2019, vol. 25, no.7, pp. 84–90. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-7-84-90.

Статья поступила в редакцию: 03.09.2019 г.  
Статья принята к публикации: 19.09.2019 г.