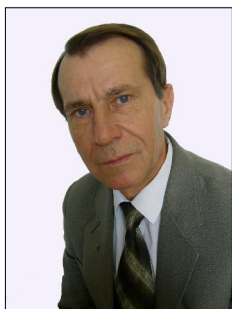


УДК 622.766

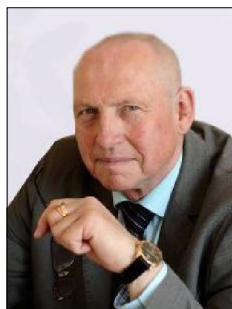
DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-7-91-96

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ И ПОЛИМИНЕРАЛЬНЫХ ГИДРОСМЕСЕЙ В ТОНКОСЛОЙНОМ ПОТОКЕ****THEORETICAL FRAMEWORK OF THE SEPARATION PROCESS OF POLYDISPERSE AND POLYMINERAL HYDRO MIXTURES IN THIN-BEDDED FLOW****В. Г. Черкасов,**

Забайкальский государственный  
университет, г. Чита  
cherkasov1948@yandex.ru

**V. Cherkasov,**

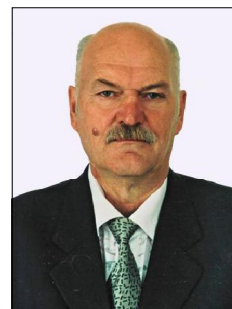
Transbaikal State University, Chita

**П. Б. Авдеев,**

Забайкальский государственный  
университет, г. Чита  
chita-apb@yandex.ru

**P. Avdeev,**

Transbaikal State University, Chita

**Ю. И. Рубцов,**

Забайкальский государственный  
университет, г. Чита  
jzi.rubtsow@yandex.ru

**Yu. Rubtsov,**

Transbaikal State University, Chita

Приводится физико-математическая модель выделения мелких и тонких классов ценного компонента из полидисперсной или полиминеральной гидросмеси на основе гравитационного процесса разделения двухфазной среды в проточных многоканальных аппаратах. Теоретически рассматривается процесс разделения двухфазной среды (жидкое – твердое) в наклонном канале при ламинарном режиме с формированием стратифицированных (двухслойных) по плотности потоков. В качестве исходного питания принимаются эфельные хвосты, образующиеся при обогащении металлоносных песков на россыпных месторождениях. Основная цель теоретического подхода заключается в установлении геометрической и кинематической связи с учетом влияния характеристик исходной суспензии на процесс разделения по плотности и крупности твердых частиц. В качестве базовой закономерности при разработке математической модели принята дифференциальная функция ( $\gamma$ -функция) с последующей «деформацией» в аналитические зависимости, учитывающие параметры тонкого слоя (высоту, длину, угол наклона каналов). Условия стратификации потоков принимаются с учетом перехода тонкодисперсной твердой фазы в осадок и значений угла наклона канала. Также дается переход от функции распределения твердой фазы по однофакторному физическому признаку (гидравлическая крупность) к двухфакторному признаку (плотность и размер частиц), что позволяет оценить геометрическое распределение осадочных слоев с учетом положения узких фракций. Такой теоретический подход на стадии исследования или проектирования подобных разделительных аппаратов позволяет одновременно увязывать характеристику исходного сырья, технологические и геометрические параметры обогатительных устройств нового типа, технические решения которых защищены патентами РФ. Применительно к полиминеральным гидросмесям приводятся результаты расчета распределения твердой фазы, полученные по найденным зависимостям, в ламинарном потоке с числом Рейнольдса менее 1000

**Ключевые слова:** тонкослойное пространство; канал; твердая фаза; ламинарный режим; функция распределения; гидросмесь; дифференциальные зависимости; физический признак; сырье; ценный компонент; параметры; процесс

**A** physico-mathematical model for the allocation of small and thin classes of valuable component from polymineral polydisperse or slurry based on the gravity separation process, the two-phase medium flowing in a multi-

channel apparatus is described. Theoretically, the process of separation of a two – phase medium (liquid-solid) in an inclined channel in the laminar regime with the formation of stratified (two-layer) density flows is considered. Efel tails are taken as the initial hydraulic mixture during the enrichment of metal-bearing sands at alluvial deposits. The main objective of the theoretical approach is to establish a geometric and kinematic relationship, taking into account the characteristics of the initial suspension on the separation process by density and size of solid particles. The differential function ( $\gamma$ -function) with subsequent “deformation” into analytical dependences, taking into account the parameters of the thin layer (height, length, channel inclination angle), is accepted as a basic regularity in the development of the mathematical model. The flow stratification conditions are assumed taking into account the transition of the fine solid phase to the sediment and the channel inclination angle. The transition from the distribution function of the solid phase on a one-factor physical feature (hydraulic size) to a two-factor feature (density and particle size) is also given, which makes it possible to estimate the geometric distribution of sedimentary layers taking into account the position of narrow fractions. Such a theoretical approach at the stage of research or design of such separation devices allows to simultaneously link the characteristics of the feedstock, technological and geometric parameters of concentrators of a new type, the technical solutions of which are protected by patents of the Russian Federation. With respect to polymineral hydro mixtures, the results of calculation of the distribution of the solid phase produced by the obtained dependences in a laminar flow with a Reynolds number less than 1000 are presented

**Keywords:** thin-layer space; channel; solid phase; laminar flow regime; distribution function of; slurry; differential relation; physical characteristic; raw; valuable component parameters of the process

При обогащении минерального сырья на объектах россыпной золотодобычи путем промывки металлоносных песков значительные потери (до 40...50 %) представлены мелкими и тонкими фракциями ценного компонента [1; 2]. Для выделения таких фракций из двухфазного потока (жидкое – твердое) разработаны новые конструкции тонкослойных аппаратов (патент РФ № 1692028 и др.), действующих на принципе двойного тонкослойного эффекта. В отличие от известных устройств [7; 8] эти аппараты кроме функций осветления и сгущения массопотоков гидросмеси конструктивно дополнены новой функцией по обогащению тяжелой фракции [3; 5]. При оценке возникающего эффекта разделения двухфазной среды на этапе исследования или проектирования подобных устройств отсутствие удовлетворительного теоретического подхода к такому процессу в совокупности затрудняет выбор геометрических параметров, технологических режимов, характеристику исходного сырья на входе и выходе. С этой целью сделана попытка теоретически увязать главные параметры тонкослойного разделения неустойчивой гидросмеси, влияющие на процесс улавливания тяжелых фракций ценного компонента. За базовую основу аналитического подхода принята дифференциальная характеристика твердой фазы из теории обогащения полезных ископаемых.

Исходную твердую фазу потока эфельных хвостов от промывки металлоносных песков будем оценивать  $\gamma$ -функцией распределения твердых частиц в жидкой среде по физическим свойствам [4]: гидравлической крупности ( $w_i$ ), размеру ( $d_s$ ), плотности частиц ( $\rho$ ); а тонкослойное пространство – по длине ( $L$ ), высоте канала ( $H$ ), углу наклона канала к горизонту ( $\alpha$ ). За кинематический параметр принимаем среднюю скорость потока в тонкослойном пространстве ( $V_{cp}$ ).

Тогда кинематическая связь типа  $w_i = w(L_i)$  между гидравлической крупностью частиц, которая меняется в пределах  $w_{min} < w_i < w_{max}$  и длиной их расслоения, в осадке имеет вид

$$w_i = \frac{HV_{cp}}{L_i \cos \alpha}. \quad (1)$$

Если вся твердая фаза на входе в канал переходит в осадок, тогда условие нормировки принимает вид

$$\int_{w_{min}}^{w_{max}} \gamma(w) dw = 1 \quad [4]. \quad (2)$$

С новой переменной ( $L_i$ ) на участке  $\Delta L$   $\gamma$ -функция переходит в зависимость как  $\gamma_i = \gamma(L_i)\Delta L$  или, с учетом условия (1),

$$\gamma_i = -\gamma[w(L_i)] \frac{HV_{cp}}{L_i^2 \cos \alpha} \Delta L. \quad (3)$$

При этом условие (2) тоже меняется, но сохраняется конечный результат

$$\int_{L(w_{\min})=L_{\max}}^{L(w_{\max})=L_{\min}} \gamma[w(L)] \frac{HV_{cp}}{L^2 \cos \alpha} dL = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \gamma[w(L)] \frac{HV_{cp}}{L^2 \cos \alpha} dL = 1. \quad (4)$$

Переход от параметра  $w$  к параметру  $L$  для  $\gamma$ -функции наглядно дан в графической интерпретации (рис. 1).

В обогащательном процессе интерес представляет улавливаемая доля твердой фа-

зы на участке АВ, отсекаемая сечением А-А (рис. 2). Учитывая зависимость (3), получаем

$$\Delta \gamma_{iAB} = \left[ 1 - \frac{l_A}{L_i} \right] \gamma[w(L_i)] \frac{HV_{cp}}{L_i \cos \alpha} \Delta L = \left[ 1 - \frac{w(L_i)}{w(l_A)} \right] \gamma(w_i) \Delta w, \quad (5)$$

а на участке АС получаем соответственно

$$\Delta \gamma_{iAC} = \frac{l_A}{L_i} \gamma[w(L_i)] \frac{HV_{cp}}{L_i \cos \alpha} \Delta L. \quad (6)$$

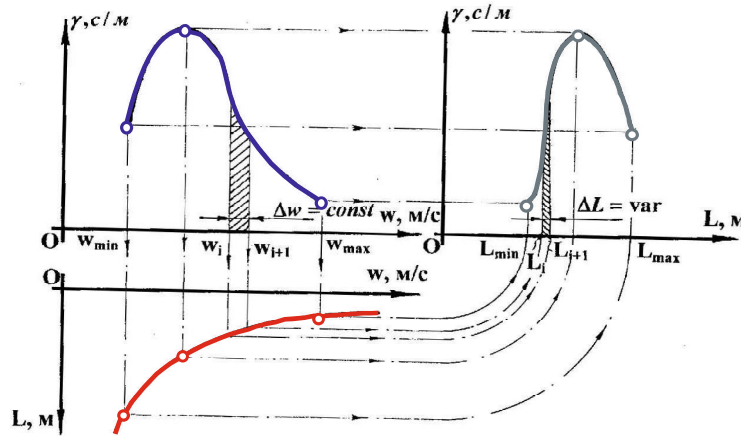


Рис. 1. Графическая интерпретация трансформации  $\gamma$ -функции от гидравлической крупности к предельной длине рассеивания частиц / Fig. 1. Graphical interpretation of the transformation-function from the hydraulic size to the maximum particle scattering length

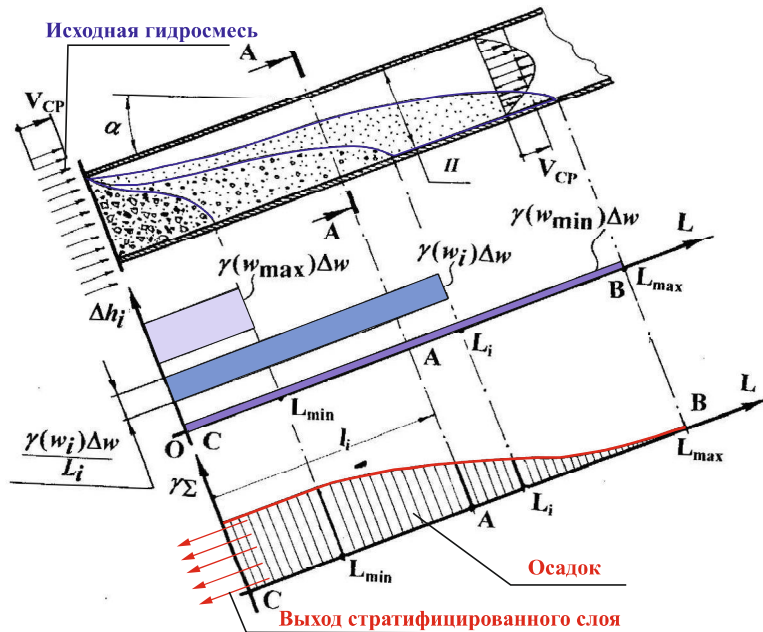


Рис. 2. Схема формирования осадка полидисперсной гидросмеси в тонкослойном канале / Fig. 2. Scheme of polydisperse slurry sediment formation in a thin-layer channel

Доля исходных частиц выше сечения А-А на участке АВ есть потерянная твердая фаза, которая определяется по зависимости (5) как

$$\gamma_{\Sigma AB} = \int_{w(L_{\max})}^{w(L_A)} \left[ 1 - \frac{w(L_{\max})}{w} \right] \gamma(w) dw = \int_{L_A}^{L_{\max}} \left[ 1 - \frac{L}{L_{\max}} \right] \gamma[w(L)] \frac{HV_{cp}}{L^2 \cos \alpha} dL, \quad (7)$$

на участок АС попадают и переходят в осадок улавливаемые частицы, а их доля составляет

$$\gamma_{\Sigma AC} = 1 - \gamma_{\Sigma AB}. \quad (8)$$

По полученным зависимостям (7) и (8) можно оценить улавливающую способность тонкослойного пространства для полидисперсной твердой фазы гидросмеси с учетом геометрических, кинематических параметров процесса в тонкослойных аппаратах нового типа (патенты РФ № 2248848, 2385771) применительно к различным характеристикам исходного потока двухфазной среды.

Для перехода от полидисперсной среды к полиминеральной в пределах проявления закона Стокса  $\gamma$ -функция будет представлять зависимость  $\gamma = \gamma(d_p, \rho)$ , если

$$w_i = \frac{d_p^2 g (\rho - \rho_{ж})}{18 \mu}, \quad (9)$$

то с учетом (1) получаем связь вида  $L_i = f(\rho, d_p)$

$$L_i = \frac{18 HV_{cp} \mu}{d_p^2 g (\rho - \rho_{ж})}, \quad (10)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость;

$\rho_{ж}$  – плотность жидкой среды. И далее переход к конечным уравнениям по условиям (7) и (8).

При переходе от продольных к поперечным параметрам высоту  $i$ -го слоя стратифицированного осадка [6]  $\Delta h_i$  (см. рис. 2), можно представить как

$$\Delta h_i = \frac{\gamma(w_i) \Delta w}{L_i} = \frac{\gamma[w(L)] HV_{cp} \Delta L}{L_i^3 \cos \alpha}, \quad (11)$$

а для всего осадочного слоя в сечении А-А

$$h_{\Sigma A} = \int_{w_{\min}}^{w(L_A)} \frac{\gamma(w) w \cos \alpha}{HV_{cp}} dw = \int_{L_A}^{L_{\max}} \gamma[w(L)] \frac{HV_{cp}}{L^3 \cos \alpha} dL. \quad (12)$$

При таком переходе от  $\gamma$ -функции к  $h$ -функции выполняется условие нормировки, как (2)

$$\int_{w_{\min}}^{w_{\max}} \gamma(w) dw = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} h_{\Sigma}(dL) = 1.$$

Для наиболее распространенных минералов проведен расчет предельной длины перераспределения осадочного слоя в тонкослойном пространстве по полученным условиям зависимости (7), (8) без нарушения условий перемещения потоков в каналах высотой  $H$ , с соблюдением условия (12), а именно  $H \gg h_{\Sigma A}$ . В качестве исходной гидравлической крупности с учетом (9) и (10) приняты экспериментальные значения [8]. Условия сохранения ламинарного потока ограничено числом Рейнольдса  $Re = \frac{\rho_{ж} V_{cp} H}{\mu} \leq 1000$ . Результаты, по которым можно провести анализ улавливающей способности тонкослойного пространства, представлены на рис. 3.

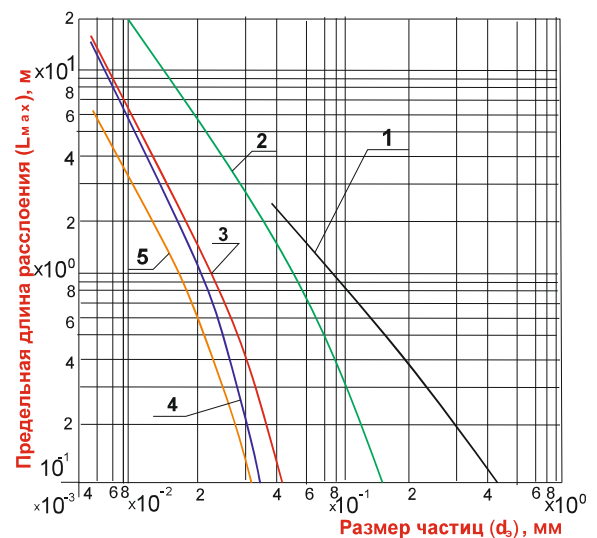


Рис. 3. Влияние физических параметров ( $\rho$ ;  $d_p$ ) минералов при их полном переходе в осадок на предельную длину канала (жидкая фаза – вода; схема массопотоков – противоточная;  $\alpha = 60^\circ$ , для канала  $Re = 1000 = const$ ): 1 – уголь,  $\rho = 1,35 \text{ г/см}^3$ ; 2 – кварц,  $\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$ ; 3 – касситерит,  $\rho = 6,92 \text{ г/см}^3$ ; 4 – галенит,  $\rho = 7,65 \text{ г/см}^3$ ; 5 – золото,  $\rho = 17 \text{ г/см}^3$  / Fig. 3. The influence of physical parameters ( $\rho$ ;  $d_p$ ) minerals in their complete transition into the sediment to the maximum length of the channel (liquid phase – water; diagram of mesopotamos – countercurrent;  $\alpha = 60^\circ$  channel  $Re = 1000 = const$ ): 1 – coal,  $\rho = 1,35 \text{ g/cm}^3$ ; 2 – quartz,  $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$ ; 3 – cassiterite,  $\rho = 6,92 \text{ g/cm}^3$ ; 4 – Galena,  $\rho = 7,65 \text{ g/cm}^3$ ; 5 – gold,  $\rho = 17 \text{ g/cm}^3$

Следовательно, рассматривая процесс распределения осадочного слоя в канале тонкослойного пространства с использованием  $\gamma$ -функции, можно теоретически увязать характеристику исходного питания с позиции обогащения ценного компонента полидис-

персных или полиминеральных гидросмесей на стадии исследования или проектирования подобных устройств, одновременно учиты-  
вая кинематические и геометрические параметры аппарата.

### Список литературы

1. Афанасенко С. И., Лазариди А. Н. Золотая жила техногенных отвалов // Золотодобыча. URL: <https://www.zolotodb.ru/articles/technical/10167> (дата обращения: 05.06.2019). Текст: электронный.
2. 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: 08.06.2019). Текст: электронный.
3. Мязин В. П., Черкасов В. Г. Расширение технологических возможностей тонкослойных аппаратов // Горный журнал. 2006. № 9. С. 61–63.
4. Тихонов О. Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1984. 208 с.
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. 71–77.
6. Barmak I., Gelfgat A. Yu., Ullmann A., Brauner N. Stability of stratified two-phase flows in inclined channels. URL: <https://www.arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1605/1605.05095.pdf> (дата обращения: 25.06.2019). Текст: электронный.
7. Kowalski P. The method of calculations of the sedimentation efficiency in tanks with lamella packets // Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. 2004. Vol. 51, No. 4. P. 371–385.
8. Lopez J. S., Burgos A. J., Rodriguez P. U. Lamella settling (FS-PRI-004). URL: <http://www.wateractionplan.com/documents/177327/558166/Lamellar+settling.pdf> (дата обращения: 25.05.2019). Текст: электронный.

### References

1. Afanasenko S. I., Lazaridi A. N. *Zolotodobycha* (Gold mining). URL: <https://www.zolotodb.ru/articles/technical/10167> (Date of access: 05.06.2019). Text: electronic.
2. Zamyatin O. V. *Zolotodobycha* (Gold mining). URL: <https://www.zolotodb.ru/articles/technical/10789> (Date of access: 08.06.2019). Text: electronic.
3. Myazin V. P., Cherkasov V. G. *Gornyy zhurnal* (Mining Journal), 2006, no. 9, pp. 61–63.
4. Tikhonov O. N. *Zakonomernosti effektivnogo razdeleniya mineralov v protsessah obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* (Patterns of the effective separation of minerals in the processes of mineral processing). Moscow: Nedra, 1984. 208 p.
5. Cherkasov V. G. *Bulletin of the Transbaikalian State University* (Bulletin of the Transbaikalian State University), 2015, no. 4, pp. 71–77.
6. Barmak I., Gelfgat A. Yu., Ullmann A., Brauner N. *Stability of stratified two-phase flows in inclined channels* (Stability of stratified two-phase flows in inclined channels). URL: <https://www.arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1605/1605.05095.pdf> (Date of access: 25.06.2019). Text: electronic.
7. Kowalski P. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics* (Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics), 2004, vol. 51, no. 4, pp. 371–385.
8. Lopez J. S., Burgos A. J., Rodriguez P. U. *Lamella settling (FS-PRI-004)* (Lamella settling (FS-PRI-004)). URL: <http://www.wateractionplan.com/documents/177327/558166/Lamellar+settling.pdf> (Date of access: 25.05.2019). Text: electronic.

### Коротко об авторах

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](mailto:cherkasov1948@yandex.ru)

Авдеев Павел Борисович, д-р техн. наук, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: разработка безопасной технологии и технологических схем повторной разработки месторождений открытым способом  
[chita-apb@yandex.ru](mailto:chita-apb@yandex.ru)

*Рубцов Юрий Иванович*, д-р техн. наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: физико-химическая геотехнология  
jri.rubtsow@yandex.ru.

#### **Briefly about the authors**

---

*Valery Cherkasov*, doctor of technical sciences, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: mining and processing machinery and equipment  
cherkasov1948@yandex.ru

*Pavel Avdeev*, doctor of technical sciences, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: development of safe technology and technological schemes for re-development of deposits by open-pit mining  
chita-apb@yandex.ru

*Yuriy Rubtsov*, doctor of engineering sciences, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: physical and chemical geotechnologies

#### **Образец цитирования**

---

*Черкасов В. Г., Авдеев П. Б., Рубцов Ю. И. Теоретические основы разделительного процесса полидисперсных и полиминеральных гидросмесей в тонкослойном потоке // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25. № 7. С. 91–96. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-7-91-96.*

*Cherkasov V., Avdeev P., Rubtsov Yu. teoretical framework of the separation process of polydisperse and polymineral hydro mixtures in thin-bedded flow // Transbaikal State University Journal, 2019, vol. 25, no.7, pp. 91–96. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-7-91-96.*

Статья поступила в редакцию: 03.09.2019 г.

Статья принята к публикации: 19.09.2019 г.