

## Исследование процессов сгущения продуктов обогащения золотосодержащих руд

© Д.А. Чернигов\*\*\*, А.В. Богородский\*\*, Р.Н. Набиулин\*\*, Т.С. Минеева\*

\*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

\*\*Иркутский научно-исследовательский институт благородных  
и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Цель – совершенствование процесса сгущения флотационного концентрата ультратонкого помола в технологии переработки упорной сульфидной золотосодержащей руды одного из месторождений Южного Урала на основе использования эффективных флокулянтов. Химический состав руды изучен при помощи гравиметрического, атомно-абсорбционного, химического, рентгенофлуоресцентного, пробирного и микроаналитического методов анализа. Гранулометрический анализ флотоконцентрата, подвергнутого сверхтонкому измельчению, производился с помощью анализатора Malvern Hydro Mastersizer 2000MU (производства Malvern Panalytical Limited, Великобритания). В экспериментах по сгущению использовались пробы одинакового состава после технологического сверхтонкого измельчения. В результате аналитических исследований вещественного состава исследуемого материала установлено, что содержание золота в руде составляет 22,8 г/т. Достигнутая крупность основного класса продукта не менее 92% составляет -20 мкм. В результате проведенных лабораторных тестов, выполненных на восьми образцах флокулянтов на основе полиакриламида, был выявлен оптимально подходящий флокулянт марки А44 (производства Китайской Народной Республики). Данный флокулянт отвечает необходимым требованиям по показателям минимального расхода, скорости осаждения и отношению Ж:Т. На основе полученных данных была рассчитана и определена зависимость удельной производительности радиального сгустителя марки JX20 (производства JPMFex Corporate Limited, Китайская Народная Республика). Установлено, что оптимальный расход флокулянта составляет 200 г/т на 1 т сгущаемого материала, что способствует сгущению 50 т пульпы с 1 м<sup>2</sup> сгустителя в сутки. Вышеуказанный флокулянт А44 рекомендован для проведения опытно-промышленных испытаний. Таким образом, для интенсификации процесса обезвоживания руд после сверхтонкого измельчения необходимы разработка, опробование и внедрение принципиально новых реагентов и совершенствование существующих технологий переработки золотосодержащих руд и концентратов.

**Ключевые слова:** металлургия благородных металлов, сульфидная золотосодержащая руда, ультратонкое измельчение флотоконцентрата, сгущение, флокулянты

**Для цитирования:** Чернигов Д.А., Богородский А.В., Набиулин Р.Н., Минеева Т.С. Исследование процессов сгущения продуктов обогащения золотосодержащих руд. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 3. С. 391–401. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-391-401>

## Research into thickening processes of concentrates of gold-bearing ores

Dmitriy A. Chernigov\*\*\*, Andrey V. Bogorodskiy\*\*, Ruslan N. Nabiulin\*\*, Tatiana S. Mineeva\*

\*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

\*\*Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The aim was to improve the thickening of an ultra-fine flotation concentrate by efficient flocculants when processing refractory sulphide gold-bearing ores from South Urals deposits. The chemical ore composition was studied using gravimetric, atomic absorption, chemical, X-ray fluorescent, assay test and electron microprobe analytical methods. Particle size analysis of the ultra-fine flotation concentrate under study was performed using a Malvern Hydro Mastersizer 2000MU analyser (Malvern Panalytical Ltd, UK). In thickening experiments, samples with the same composition after the ultra-fine grinding process were used. The gold content in the ore was determined (22.8 g/t) based on analytical studies on the material composition of samples. At least 92% of the final grain size class is -20 microns. Laboratory tests performed on eight samples containing polyacrylamide-based flocculants revealed an optimal A44 flocculant (produced in China). The flocculant meets the requirements for minimum flow rate, deposition rate and L:S ratio. The specific performance of the JX20 radial thickener (JPMFex Corp. Ltd., China) was calculated. The optimal flocculant flow rate is 200 g/t

per 1 t of thickened material, leading to thickening 50 t of pulp per 1 m<sup>2</sup> of thickener per day. The A44 flocculant is recommended for pilot testing. Thus, developing, testing and implementing fundamentally new reagents and improving existing technologies of processing gold-containing ores and concentrates are necessary to intensify the ore dewatering processes after ultra-fine grinding.

**Keywords:** metallurgy of precious metals, sulphide gold ore, ultrafine grinding of flotation concentrate, thickening, flocculants

**For citation:** Chernigov DA, Bogorodskiy AV, Nabiulin RN, Mineeva TS. Research into thickening processes of concentrates of gold-bearing ores. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3):391–401. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-391-401>

## ВВЕДЕНИЕ

Переработка руд благородных, редких и цветных металлов с применением методов обогащения и гидрометаллургических технологий является актуальным направлением современной металлургии [1–11].

Пристального внимания заслуживает наблюдающаяся в последние годы в золотодобывающей промышленности тенденция снижения доли простых в технологическом отношении руд, извлечение металла из которых обусловлено доступной формой. В связи с этим возникла необходимость вовлечения в переработку упорного золотосодержащего сырья, которое по своему вещественному составу является сложным. Золото присутствует в нем в состоянии субмикроскопической, тонкодисперсной вкрапленности в сульфидных минералах – его носителях. Для такого сырья неприемлемы традиционные подходы и необходима разработка принципиально новых и совершенствование существующих на сегодняшний день технологий.

В настоящее время выделяют ряд предложений и способов решения этой сложной технологической задачи. Одним из наиболее перспективных и востребованных из них является вскрытие тонковкрапленного золота путем сверхтонкого измельчения упорных сульфидных концентратов с последующим окислительным выщелачиванием под высоким давлением (данный способ выщелачивания называется автоклавным), это решение имеет определенную технологическую сложность. Получаемые тонкодисперсные пульпы в процессах гидрометаллургии осложняют

операции обезвоживания и разделения твердой и жидкой фаз ввиду того, что частицы тонкоизмельченного материала имеют очень малый вес и им трудно осаждаться в жидкостной структуре естественным путем, являющимся неотъемлемой частью гидрометаллургических технологий. Зачастую на золотоизвлекательных фабриках (ЗИФ) процесс сгущения является проблематичным действием, оказывающим влияние на показатели других переделов и технологии в целом, что может привести к снижению производительности оборудования, увеличению энергетических и тепловых затрат. Площадь, занятая сгустителями, составляет около 25% общей площади предприятия, а стоимость передела обезвоживания достигает 30% от общей стоимости переработки руд, что влияет на себестоимость продукции. Поэтому исследования, направленные на интенсификацию обезвоживания ультратонких пульп, представляются весьма актуальными<sup>1</sup>. Данное исследование позволит снизить потери материала со сливами сгустителей, повысить извлечение металлов, увеличить производительность предприятия без установки дополнительного оборудования [12, 13].

Основным направлением оптимизации процессов сгущения является использование высокопроизводительных аппаратов, а также реагентов (для увеличения скорости осаждения твердой фазы), среди которых широко применяются в различных областях металлургии флокулянты [14–21].

Вследствие этого целесообразным явилось проведение лабораторных опытов для

<sup>1</sup>Котляр Ю.А., Меретуков М.А., Стрижко Л.С. Металлургия благородных металлов: учебник. В 2-х кн. Кн. 2. М.: ИД «Руда и металлы», 2005. 432 с.

оценки и подбора флокулянта с целью разработки рекомендаций применимости в технологическом процессе сгущения золотосодержащего флотоконцентрата после сверхтонкого измельчения.

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ ФЛОТОКОНЦЕНТРАТА ПОСЛЕ СВЕРХТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

**Гранулометрический анализ исследуемого материала.** Гранулометрический анализ состава исходного и ультратонкоизмельченного флотоконцентрата, произведенного на ЗИФ, выполняли на гранулометре Malvern Hydro Mastersizer 2000MU (Великобритания) (рис. 1).

Показано (табл. 1), что крупность частиц исходного флотоконцентрата до сверхтонкого состояния составляла не менее 98% класса минус 0,071 мм.

Отбор пульпы для выполнения анализа

образца флотоконцентрата после сверхтонкого измельчения проводили с использованием трех последовательно отобранных проб разгрузки мельницы, результаты гранулометрического анализа приведены в табл. 1.

Результаты гранулометрического анализа проб 1, 2 и 3, отобранных с места питания сгустителя в режиме реального времени на ЗИФ с использованием анализатора Malvern Hydro Mastersizer 2000MU, представлены ниже на рис. 2–4.

По технологической схеме ЗИФ в питание сгустителя перед автоклавным выщелачиванием поступает готовый продукт сверхтонкого измельчения крупностью частиц -20 мкм. Достигнутая крупность основного класса продукта классифицируется как тонкодисперсные материалы, которые в технологических процессах, без вовлечения в них реагентов, являются трудно поддающимися сгущению.



Рис. 1. Гранулометр Malvern Hydro Mastersizer 2000MU

Fig. 1. Malvern Hydro Mastersizer 2000MU analyser

**Таблица 1.** Гранулометрический состав флотоконцентрата золотоизвлекательной фабрики до и после измельчения

**Table 1.** Grain-size composition of gold recovery plant flotation concentrate before and after grinding

Классы крупности, мкм	Массовая доля минусового класса, %			
	исходный концентрат	1 проба измельчения	2 проба измельчения	3 проба измельчения
71	97,25	100	100	100
40	90,51	99,55	99,76	100
20	75,22	92,11	92,51	92,22
10	52,65	67,04	71,40	74,9
5	28,32	36,22	39,81	42,65
3	14,30	18,25	20,27	22,2

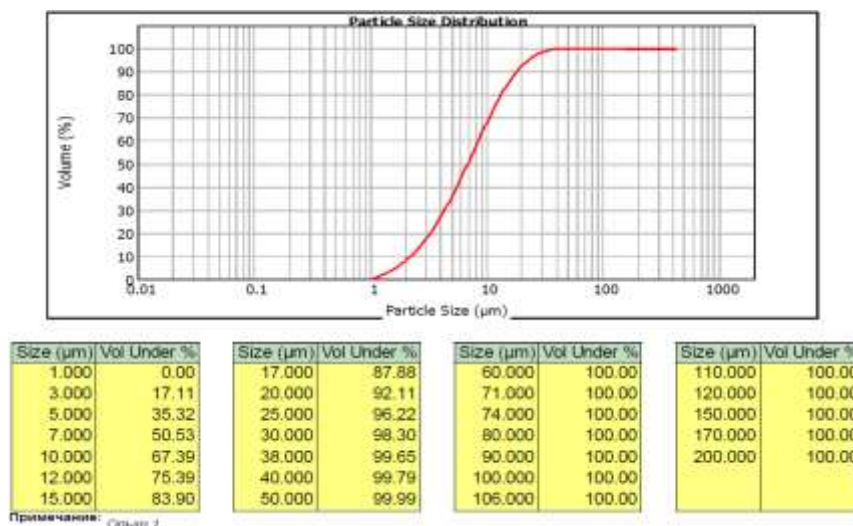


Рис. 2. Гранулометрический состав флотоконцентрата пробы № 1  
Fig. 2. Grain-size composition of flotation concentrate of the sample no. 1

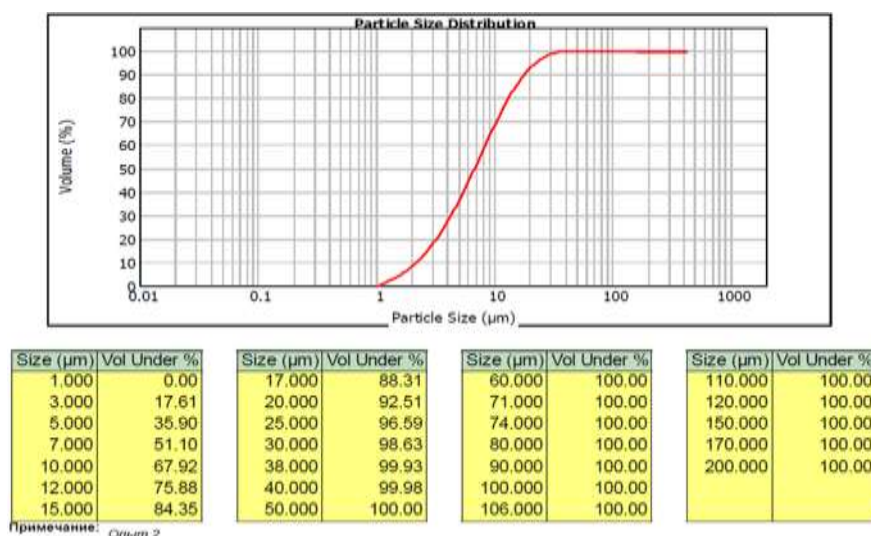


Рис. 3. Гранулометрический состав флотоконцентрата пробы № 2  
Fig. 3. Grain-size composition of flotation concentrate of the sample no. 2

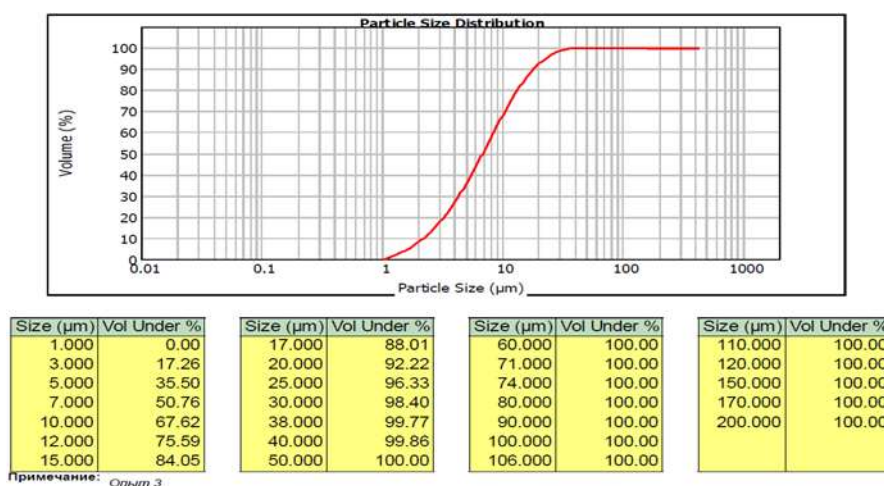


Рис. 4. Гранулометрический состав флотоконцентрата пробы № 3  
Fig. 4. Grain-size composition of flotation concentrate of the sample no. 3



**Вещественный состав флотоконцентрата.** Объектом исследования являлся сульфидный флотоконцентрат текущей добычи руды одного из месторождений Южного Урала.

По результатам ситового анализа крупность флотоконцентрата составила 98% класса -0,071 мм.

Химический состав сульфидного золото-медного флотоконцентрата приведен в табл. 2.

На основании приведенного химического состава исследуемого флотоконцентрата проведен расчет его рационального состава, который приведен в табл. 3.

**Таблица 2.** Химический состав флотоконцентрата  
**Table 2.** Chemical composition of flotation concentrate

Компонент	Массовая доля, %	Компонент	Массовая доля, %
SiO <sub>2</sub>	45,8	S <sub>общ</sub>	14,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,4	S <sub>окисл</sub>	0,5
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5	S <sub>сульф</sub>	13,8
K <sub>2</sub> O	1,0	CO <sub>2</sub>	0,2
MgO	0,4	Cu	3,4
CaO	0,4	Zn	0,8
TiO <sub>2</sub>	0,3	As	1,1
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	Sb	0,3
MnO	0,03	Pb	0,1
Fe <sub>общ</sub>	14,5	Au г/т	22,8
Fe <sub>окисл</sub>	4,7	Ag г/т	31,2
Fe <sub>сульф</sub>	9,8	н.о.*	н.о.

\*н.о. – не обнаружено.

**Подбор флокулянта для сгущения флотоконцентрата золотоизвлекательной фабрики после сверхтонкого измельчения и определение показателей сгущения.** Исследования по сгущению и

расчет параметров данного процесса проводили согласно методике В.И. Зеленова [13].

В ходе исследований производился визуальный отбор флокулянтов, предназначенных для сгущения пульпы, с использованием мобильной установки с одновременной загрузкой до 5 реагентов за один цикл применения (разработка АО «Иргиредмет»), рис. 5, 6.

Для подбора наиболее эффективного флокулянта по скоростным характеристикам на исследуемом продукте испытаны следующие синтетические полимеры на основе полиакриламида: А44, А46, А48, А49, 231PVL, А414, А409, RH3842 (табл. 4).

Как следует из приведенных в табл. 3 результатов, визуальное тестирование по выбору флокулянта для сгущения флотоконцентрата сверхтонкого измельчения показало, что оптимальная скорость осаждения достигнута с применением флокулянта А44, в этом случае высота осветленного слоя в 2–3 раза выше, чем для остальных реагентов.

В связи с этим данный флокулянт (А44) был отобран для дальнейшего тестирования на определение оптимальной дозировки, табл. 5 (рис. 7).

На рис. 8 приведены кривые сгущения пульпы флотоконцентрата ультратонкого помола с расходом флокулянта 50, 100, 150, 200 и 300 г/т.

В табл. 6 приведены показатели сгущения, рассчитанные на основании данных рис. 8.

Зависимость удельной производительности сгущения от расхода флокулянта для сгущения флотоконцентрата приведена на рис. 9.

**Таблица 3.** Рациональный состав флотационного концентрата  
**Table 3.** Rational composition of flotation concentrate

Компонент	Cu	Zn	Fe	S	As	Другие	Всего
Cu <sub>12</sub> As <sub>4</sub> S <sub>13</sub>	2,80	–	–	1,53	1,10	–	5,43
CuFeS <sub>2</sub>	0,60	–	0,53	0,61	–	–	1,74
ZnS	–	0,80	–	0,40	–	–	1,20
FeS <sub>2</sub>	–	–	9,81	11,26	–	–	21,07
Другие	–	–	–	–	–	70,6	70,56
Всего	3,40	0,80	10,3	13,8	1,1	70,6	100,00

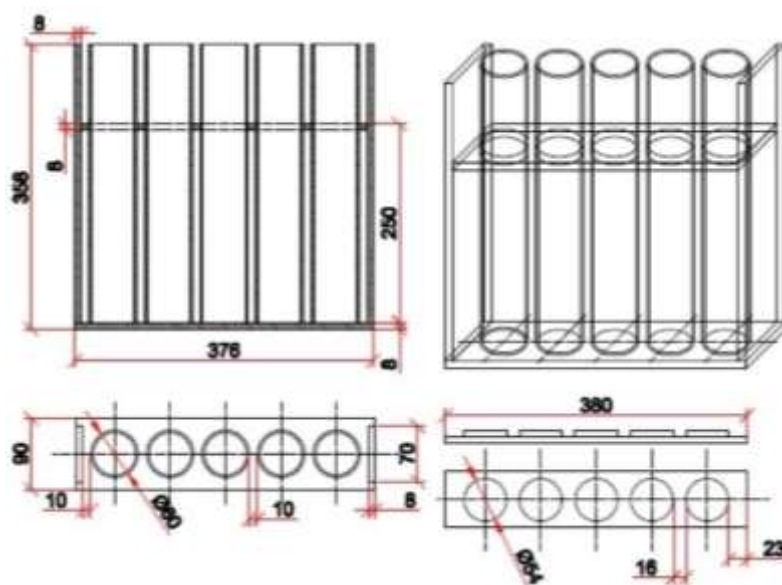


Рис. 5. Эскиз мобильной установки с одновременной загрузкой до пяти реагентов за один цикл применения  
 Fig. 5. A rough design of a portable installation with the simultaneous loading of up to five reagents in one application cycle



Рис. 6. Мобильная установка с одновременной загрузкой до пяти реагентов за один цикл применения  
 Fig. 6. Portable installation with simultaneous loading of up to five reagents in one application cycle

Таблица 4. Характеристика полиакриламидных флокулянтов  
 Table 4. Characteristics of polyacrylamide flocculants

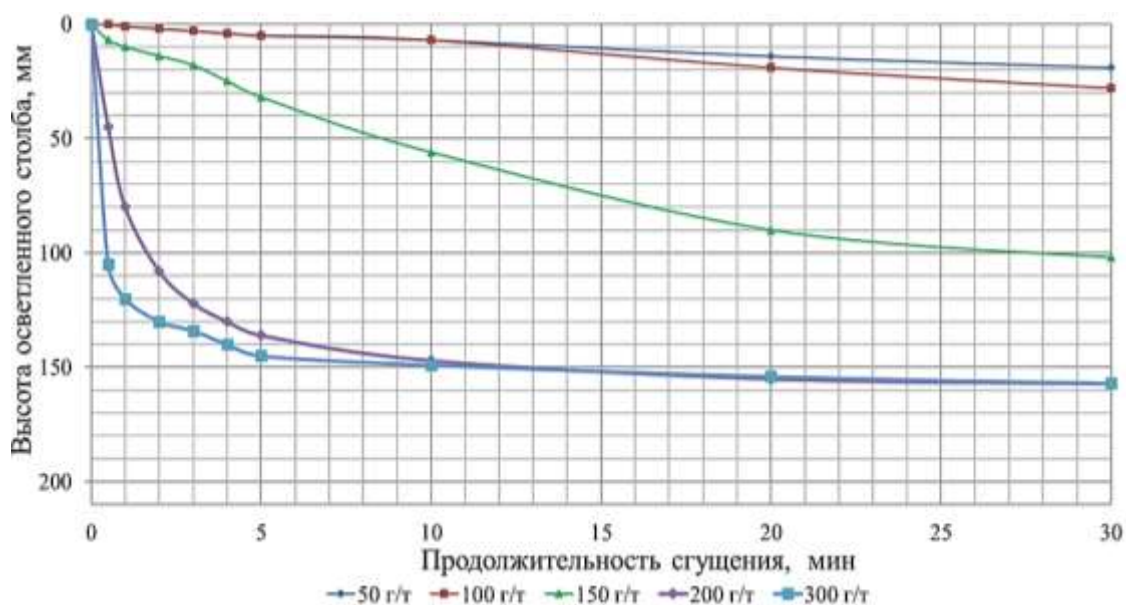
Марка флокулянта	Степень ионизации, %	Содержание основного вещества, %	Нерастворимый остаток	Вязкость 1% раствора, сПз	Остаточный акриламид, мкг/г
A44	3	≥ 88,00	0,00–3,50	1500–4500	0–999
A46	3	≥ 88,50	0,00–3,50	1500–4500	0–999
A48	3	≥ 88,00	0,00–3,50	1500–4500	0–999
A49	3	≥ 88,00	0,00–3,50	2000–5000	0–999
A231PVL	3	≥ 87,00	0,00–3,50	2000–5000	0–999
A414	10	≥ 88,50	0,00–3,50	3000–6000	0–999
A409	10	≥ 88,00	0,00–3,50	3000–6000	0–499
RH3842	10	≥ 88,00	0,00–3,50	3000–6000	0–999

**Таблица 5.** Высота осветленного слоя при осаждении флотоконцентрата  
**Table 5.** Height of the clarified layer under the deposition of flotation concentrate

Высота осветленного слоя, мм								
Время, мин	A44	A46	A48	A49	231 PVL	A414	A409	RH 3842
0,5	4	1	1	1	1	0	0	2
1	10	2	2	2	6	1	1	7
2	15	3	5	4	10	1	1	12
3	19	4	10	8	14	2	2	15
4	28	7	13	11	19	5	8	20
5	32	9	15	14	24	9	10	23
10	57	24	30	28	39	16	17	36



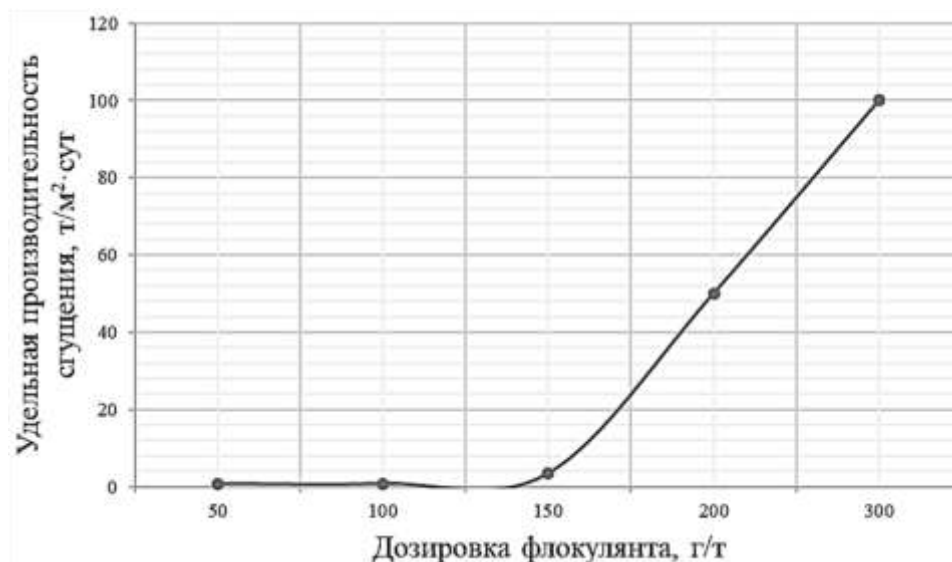
**Рис. 7.** Проведение подбора флокулянта в лабораторных цилиндрах по методике В.И. Зеленова  
**Fig. 7.** Selection of flocculant in laboratory cylinders according to V.I. Zelenov's procedure



**Рис. 8.** Кривые сгущения флотоконцентрата тонкого помола с различной загрузкой флокулянта A44  
**Fig. 8.** Curves of finely ground flotation concentrate thickening with different loading of flocculant A44

**Таблица 6.** Показатели сгущения флотоконцентрата при различном расходе флокулянта А44  
**Table 6.** Indicators of flotation concentrate thickening at different consumption of flocculant A44

Дозировка флокулянта Yangfloc A44, г/т	Ж:Т в пульпе		Скорость осветления, м/ч	Удельная производительность сгущения, т/(м <sup>2</sup> ·сут)	Чистота слива
	исходная	в зоне сжатия			
50	4	1,44	0,08	0,76	очень грязная
100		1,44	0,08	0,78	очень грязная
150		1,45	0,36	3,39	мутная
200		1,47	5,40	50,00	чистая
300		1,47	10,80	100,00	чистая



**Рис. 9.** Зависимость удельной производительности сгущения от расхода флокулянта  
**Fig. 9.** Dependence of specific thickening performance on flocculant consumption

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании представленных производственных данных и проб проведены лабораторные исследования по подбору флокулянта, произведены расчеты удельной производительности оборудования. Также в ходе исследования была определена зависимость удельной производительности сгустителя от дозировки реагента.

Установлено, что из числа рассмотренных

флокулянтов наилучшие показатели сгущения обеспечиваются при использовании анионного флокулянта марки А44 на основе полиакриламида. Также стоит отметить, что без применения флокулянта в промышленных масштабах процесс сгущения тонкоизмельченного флотоконцентрата не может быть возможным, для интенсификации процесса сгущения использование флокулянта является необходимой мерой.

## Список литературы

1. Баликов С.В., Дементьев В.Е., Минеев Г.Г. Плавка золотосодержащих концентратов. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 2002. 368 с.
2. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – A review // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 115-116. P. 30–51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>
3. Abbruzzese C., Fornari P., Massidda R., Veglio F., Ubaldini S. Thiosulphate leaching for gold hydrometallurgy // Hydrometallurgy. 1995. Vol. 39. P. 265–276.
4. Willner J., Fornalczyk A., Cebulski J., Janiszewski K.

- Preliminary studies on simultaneous recovery of precious metals from different waste materials by pyrometallurgical method // Archives of Metallurgy and Materials. 2014. Vol. 59. Iss. 2. P. 801–804. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0136>
5. Черняк А.С. Химическое обогащение руд. М.: Недра, 1987. 224 с.
6. Василькова А.О., Бывальцев А.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Оценка возможности переработки техногенного сырья с применением ультразвука



ких концентраций цианистого натрия. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 5. С. 1105–1112.

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1105-1112>

7. Chanturya V.A., Bunin I.J., Lunin V.D. Nontraditional highly effective breaking up technology for resistant gold containing ores and beneficiation products // XXII International Mineral Processing Congress (Cape Town, 28 September – 3 October 2003). Cape Town, 2003. P. 135–139.

8. Hedjazi F., Monhemius A.J. Industrial application of ammonia-assisted cyanide leaching for copper-gold ores // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 126. P. 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.005>

9. Ёлшин В.В., Голодков Ю.Э. Исследование двойного электрического слоя при сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1337–1346.

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1337-1346>

10. Жмурова В.В., Немчинова Н.В., Васильев А.А. Гидрохимическая очистка от меди и свинца золотосодержащих катодных осадков // *Цветные металлы*. 2019. № 8. С. 64–74.

<https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>

11. Жмурова В.В., Немчинова Н.В. Опыт комплексного использования золотосодержащего сырья при производстве драгоценных металлов // *Записки горного института*. 2018. Т. 233. С. 506–511.

<https://doi.org/10.31897/PMI.2018.5.506>

12. Ahmed H.A.M., El-Midany A.A. Statistical optimization of gold recovery from difficult leachable sulphide minerals using bacteria // *Materials Testing – Materials and Components Technology and Application*. 2012. Vol. 54. Iss. 5. P. 351–357. <https://doi.org/10.3139/120.110339>

13. Зеленов В.И. Методика исследования золотосодержащих руд. М.: Недра, 1973. 227 с.

14. Сизяков В.М., Иваник С.А., Фокина С.Б. Исследо-

вание процессов сгущения и фильтрации тонкодисперсных окисленных пульп // *Обогащение руд*. 2012. № 2. С. 24–28.

15. Peng Yunyan, Jin Dong, Li Jingmiao, Wang Chunfeng. Flocculation of mineral processing wastewater with Polyacrylamide // *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020. Vol. 565. P. 012101.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012101>

16. Liu Wen-li, Hu Yue-hua, Sun Wei. Separation of diaspore from bauxite by selective flocculation using hydrolyzed polyacrylamide // *Journal of Central South University*. 2014. Vol. 21. P. 1470–1476.

<https://doi.org/10.1007/s11771-014-2087-0>

17. Yu Baoqiang, Che Xiaokui, Zheng Qi. Flotation of ultra-fine rare earth minerals with selective flocculant PHDA // *Minerals Engineering*. 2014. Vol. 60. P. 23–25. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.027>

18. Yu M., Mei G., Li Y., Liu D., Peng Y. Recovering rare earths from waste phosphors using froth flotation and selective flocculation // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2017. Vol. 34. No. 4. P. 161–169.

<https://doi.org/10.19150/mmp.7855>

19. Неизвестных Н.Н., Богданов А.В., Мячин А.В., Федотов К.В. Исследование процесса сгущения пульпы при переработке руд месторождений Биркачан и Цоколь // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. № 6. С. 147–151.

20. Tyutrin A.A., Vologin A.S. Analysis of the Composition and Properties of the Silicon Production Wet Cleaning Sludge to Identify Sustainable Techniques for its Processing // *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. P. 649–654. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.649>

21. Ivanik S.A., Ilyukhin D.A. Hydrometallurgical technology for gold recovery from refractory gold-bearing raw materials and the solution to problems of subsequent dehydration processes // *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017. Vol. 33. No. 1. P. 891–897.

## References

1. Balikov SV, Dement'ev VE, Mineev GG. *Smelting of gold concentrates*. Irkutsk: IrGiredmet; 2002, 368 p. (In Russ.)

2. Syed S. Recovery of gold from secondary sources – A review. *Hydrometallurgy*. 2012;115-116:30–51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>

3. Abbruzzese C, Fornari P, Massidda R, Veglio F, Ubaldini S. Thiosulphate leaching for gold hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*. 1995;39:265–276.

4. Willner J, Fornalczyk A, Cebulski J, Janiszewski K. Preliminary studies on simultaneous recovery of precious metals from different waste materials by pyrometallurgical method. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2014;59(2):801–804. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0136>

5. Chernyak AS. *Chemical concentration of ores*. Moscow: Nedra; 1987, 224 p. (In Russ.)

6. Vasilkova AO, Byval'tsev AV, Khmel'nitskaya OD, Voiloshnikov GI. Assessing possibility of technogenic raw material processing using ultra-low concentrations of so-

dium cyanide. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5): 1105–1112. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1105-1112>

7. Chanturya VA, Bunin IJ, Lunin VD. Nontraditional highly effective breaking up technology for resistant gold containing ores and beneficiation products. In: *XXII International Mineral Processing Congress*. 28 September – 3 October 2003, Cape Town. Cape Town; 2003, p. 135–139.

8. Hedjazi F, Monhemius AJ. Industrial application of ammonia-assisted cyanide leaching for copper-gold ores. *Minerals Engineering*. 2018;126:123–129. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.005>

9. Elshin VV, Golodkov YuE. Studying electric double layer under sorption of gold on activated carbons from thiocarbamide solutions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1337–1346. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1337-1346>

10. Zhmurova V.V., Nemchinova N.V., Vasiliev A.A.

Removal of copper and lead from gold-bearing cathode deposits by hydrochemical treatment. *Tsvetnye Metally*. 2019;8:67–74. (In Russ.)

<https://doi.org/10.17580/tsm.2019.08.07>

11. Zhmurova VV, Nemchinova N V. The practice of comprehensive utilisation of gold-bearing materials in the precious metals industry. *Zapiski Gornogo instituta*. 2018; 233:506–511. <https://doi.org/10.31897/PMI.2018.5.506>

12. Ahmed HAM, El-Midany AA. Statistical optimization of gold recovery from difficult leachable sulphide minerals using bacteria. *Materials Testing – Materials and Components Technology and Application*. 2012;54(5):351–357. <https://doi.org/10.3139/120.110339>

13. Zelenov VI. Research methodology for gold-bearing ores. Moscow: Nedra; 1973, 227 p. (In Russ.)

14. Sizyakov VM, Ivanik SA, Fokina SB. Fine-dispersed oxidized pulps thickening and filtration processes study. *Obogashchenie rud*. 2012;2:24–28. (In Russ.)

15. Peng Yunyan, Jin Dong, Li Jingmiao, Wang Chunfeng. Flocculation of mineral processing wastewater with polyacrylamide. In: *Earth and Environmental Science: IOP Conference Series*. 2020;565:012101. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/565/1/012101>

16. Liu Wen-li, Hu Yue-hua, Sun Wei. Separation of diaspore from bauxite by selective flocculation using hydrolyzed polyacrylamide // *Journal of Central South University*.

2014;21:1470–1476. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2087-0>

17. Yu Baoqiang, Che Xiaokui, Zheng Qi. Flotation of ultra-fine rare earth minerals with selective flocculant PHDA. *Minerals Engineering*. 2014;60:23–25. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.027>

18. Yu M, Mei G, Li Y, Liu D, Peng Y. Recovering rare earths from waste phosphors using froth flotation and selective flocculation. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2017;34(4):161–169. <https://doi.org/10.19150/mmp.7855>

19. Neizvestnykh NN, Bogdanov AV, Myachin AV, Fedotov KV. Studying ore pulp thickening of "Birkachan" and "Tsokol" gold-silver deposits. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;6:147–151. (In Russ.)

20. Tyutrin AA, Vologin AS. Analysis of the Composition and Properties of the Silicon Production Wet Cleaning Sludge to Identify Sustainable Techniques for its Processing // *Solid State Phenomena*. 2021;316:649–654. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.649>

21. Ivanik SA, Ilyukhin DA. Hydrometallurgical technology for gold recovery from refractory gold-bearing raw materials and the solution to problems of subsequent dehydration processes. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017;33(1):891–897.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Чернигов Дмитрий Александрович**,  
магистрант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
старший инженер Инженерно-Коммерческого центра,  
АО «Иргиредмет»,  
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;  
✉ e-mail: dchernigov@mail.ru

**Богородский Андрей Владимирович**,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник Лаборатории  
металлургии,  
АО «Иргиредмет»,  
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;  
e-mail: bav@irgiredmet.ru

**Набиулин Руслан Нурлович**,  
научный сотрудник Лаборатории металлургии,  
АО «Иргиредмет»,  
664025, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;  
e-mail: r\_nabiulin@irgiredmet.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dmitriy A. Chernigov**,  
Master's Degree Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
Senior Engineer of the Engineering and Commercial  
Centre,  
JSC Irgiredmet,  
38 Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia;  
✉ e-mail: dchernigov@mail.ru

**Andrey V. Bogorodskiy**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher of the Metallurgy Laboratory,  
JSC Irgiredmet,  
38 Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia;  
e-mail: bav@irgiredmet.ru

**Ruslan N. Nabiulin**,  
Researcher of the Metallurgy Laboratory,  
JSC Irgiredmet,  
38 Gagarin Boulevard, Irkutsk 664025, Russia;  
e-mail: lab15@irgiredmet.ru

**Минеева Татьяна Султановна,**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: \_ksu\_@inbox.ru

**Tatiana S. Mineeva,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Non-Ferrous Metals  
Department,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: \_ksu\_@inbox.ru

#### **Заявленный вклад авторов**

Чернигов Д.А., Богородский А.В., Набиулин Р.Н. – проведение экспериментов и обработка данных; Минеева Т.С. – научное руководство, концепция исследований.

#### **Contribution of the authors**

Chernigov D.A., Bogorodskiy A.V., Nabiulin R.N. conducted experiments and processed data. Mineeva T.S. was responsible for the scientific supervision and research concept.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 23.04.2021; одобрена после рецензирования 29.05.2021; принята к публикации 30.06.2021.

#### **Information about the article**

The article was submitted 23.04.2021; approved after reviewing 29.05.2021; accepted for publication 30.06.2021.