

Научная статья
 УДК 622.765.4
 DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-62-71

Совершенствование схемы и режима внутреннего водооборота пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов

Евгений Геннадьевич Коваленко

«Якутнипроалмаз», Акционерная компания «АЛРОСА», г. Мирный, Россия
 kovalenkoeg@gmail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию
 20.02.2024

Одобрена после
 рецензирования 05.05.2024

Принята к публикации
 20.05.2024

Ключевые слова:

алмазы, кимберлиты,
 шламы, пенная сепарация,
 замкнутый водооборот,
 гидроциклон, осветлитель,
 флотоклассификация,
 собиратель,
 пенообразователь

Объект исследования – процесс обогащения алмазосодержащих кимберлитов пенной сепарацией. Предмет исследования – оборотная вода отделения пенной сепарации. Цель исследования – повышение эффективности процесса пенной сепарации при обогащении алмазосодержащих кимберлитов путём совершенствования схемы и режима внутреннего водооборота. Задачи исследования: изучение влияния шламов на состояние поверхности и флотуемость алмазов; анализ состава шламовых продуктов и установление причин роста концентрации шламов в оборотной воде; обоснование подхода к выбору технологий и разработке схем обесшламливания оборотных вод цикла пенной сепарации. Для установления степени влияния шламов на состав поверхности и флотуемость алмазов применялась методика электронно-зондового рентгеноспектрального анализа и поставлены опыты по пенной сепарации алмазо-кимберлитовой смеси. Промышленные испытания режимов и схем осветления оборотной воды производились на обогатительной фабрике № 3 Мирнинского горно-обогатительного комбината (Мирнинского ГОКа). Результаты рентгеноэлектронной спектроскопии показали, что наблюдается пропорциональная зависимость снижения флотуемости алмазов от доли гидрофильных покрытий на поверхности алмаза. Для разрушения органо-воздушно-минеральных агрегатов, являющихся существенным источником шламов, предложено использование высокотурбулентных режимов классификации в гидроциклоне, позволяющее отделить зёрна гидрофобных минералов кимберлита от капель аполярного собирателя. В заключительной стадии осветления оборотной воды предложено использовать технологию флотоклассификации в трёхпродуктовом осветлителе, обеспечивающем получение очищенной от осаждающихся и всплывающих фракций водной фазы. Результаты испытаний разработанных схем и режимов обесшламливания оборотной воды в отделении пенной сепарации обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОКа показали уменьшение концентрации шламов в оборотной воде в 2 раза, сокращение расхода флотационных реагентов на 7–10 % и повышение извлечения алмазов на 1,2 %.

Original article

Improvement of the Scheme and Regime of Internal Water Circulation of Foam Separation of Diamond-Containing Kimberlites

Evgeny G. Kovalenko

Yakutniproalmaz Institute, Alrosa Joint Stock Company "ALROSA", Mirny, Russia
 kovalenkoeg@gmail.ru

Information about the article

Received February 20, 2024

Approved after review
 May 05.2024

Accepted for publication
 May 20, 2024

The object of this study is the process of enrichment of diamond-containing kimberlites by foam separation. The subject of the research is the recycled water of the foam separation unit. The purpose of the study is to increase the foam separation process efficiency in the enrichment of diamond-containing kimberlites by improving the scheme and regime of internal water circulation. The objectives of the study are to study the effect of sludge on the surface condition and floatability of diamonds, to analyze the composition of sludge products and to establish the causes of the increase in the concentration of sludge in recycled water, to substantiate the approach to the choice of technologies and the development of schemes for desliming recycled waters of the foam separation cycle. To determine the degree of sludge influence on the surface composition and floatability of diamonds, the technique of electron probe

Keywords:

diamonds, kimberlites, slimes, foam separation, closed water cycle, hydrocyclone, clarifier, flotation classification, collector, foaming agent

X-ray spectral analysis has been used and experiments have been conducted on foam separation of a diamond-kimberlite mixture. Industrial tests of the modes and schemes of clarification of recycled water are carried out at the enrichment plant No. 3 of the Mirninsky Mining and Processing Plant (MPP). The results of X-ray electron spectroscopy show that there is a proportional dependence of the decrease in diamond floatability on the proportion of hydrophilic coatings on the diamond surface. For the destruction of organic-air-mineral aggregates, which are an essential source of sludge, it is proposed to use highly turbulent classification modes in a hydrocyclone, which allows separating grains of hydrophobic kimberlite minerals from drops of apolar collector. In the final stage of clarification of recycled water, it is proposed to use flotation classification technology in a three-product clarifier, which ensures the production of an aqueous phase purified from precipitating and surfacing fractions. The test results of the developed schemes and modes of recycled water desalination in the foam separation department of the processing plant No. 3 of Mirninsky MPP have showed a decrease in the concentration of sludge in recycled water by 2 times, a reduction in the consumption of flotation reagents by 7-10 % and an increase in diamond recovery by 1.2 %.

Введение. Актуальность исследования влияния шламов на состояние поверхности и флотируемость алмазов, обоснования технологии и разработки схем обесшламливания оборотных вод цикла пенной сепарации обусловлена необходимостью повышения эффективности процесса пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов, который является основным источником получения мелких классов алмазов, находящихся всё большее применение в различных отраслях промышленности и при производстве украшений [12]. Решение поставленных задач обеспечивает снижение расхода свежей воды и уменьшение расхода флотационных реагентов [1; 16; 18].

Объект исследования – процесс обогащения алмазосодержащих кимберлитов пенной сепарацией.

Предмет исследования – оборотная вода отделения пенной сепарации.

Цель исследования – повышение эффективности процесса пенной сепарации при обогащении алмазосодержащих кимберлитов путём совершенствования схемы и режима внутреннего водооборота.

Задачи исследования:

1) изучение влияния шламов на состояние поверхности и флотируемость алмазов;

2) анализ состава шламовых продуктов и установление причин роста концентрации шламов в оборотной воде;

3) обоснование подхода к выбору технологий и разработке схем обесшламливания оборотных вод цикла пенной сепарации.

Разработанность темы. Анализ современного состояния проблемы повышения эффективности процесса пенной сепарации при обогащении алмазосодержащих кимберлитов показал, что при высокой степени замыкания водооборота водная фаза цикла

пенной сепарации характеризуется высоким содержанием шламов. Из-за насыщения мелкими глинистыми частицами оборотная вода ухудшает свойства. Повышенная концентрация шламов обуславливает возрастание вязкости оборотной воды, что затрудняет разделение минералов и обезвоживание продуктов [10]. Обладая высокой флотируемостью, шламы ухудшают качество концентратов. Налипая на поверхности алмазов, шламы препятствуют закреплению собирателя и снижают извлечение алмазов в концентрат [Там же]. Обладая развитой поверхностью, шламы поглощают флотационные реагенты, вызывая резкое увеличение их расхода [3; 5].

Таким образом, применение замкнутого водооборота, с одной стороны, является положительным фактором, обеспечивающим сокращение расхода свежей воды и реагентов, а с другой – приводит к увеличению концентрации шламов и ухудшению показателей пенной сепарации [5; 6].

Для нейтрализации вредного действия шламов при пенной сепарации алмазов используются операции обесшламливания как исходного питания, так и оборотной воды [11]. Для более полного замыкания водооборота требуется усовершенствование режима и схемы внутреннего водооборота цикла пенной сепарации, которое позволит предотвратить снижение качества оборотной воды.

Высокие показатели процесса обесшламливания могут быть достигнуты при использовании гидроциклонов [14]. Несмотря на то что в гидроциклонах показатели разделения ниже, чем в сепараторах и центрифугах, они обладают рядом преимуществ, которыми являются отсутствие движущихся частей, простота конструкции, невысокая стоимость, удобство в эксплуатации, высокая производительность. Другим типом аппара-

тов, обладающих высокой эффективностью, являются трёхпродуктовые флотоклассификаторы, позволяющие удалить из оборотной воды как гидрофильную, так и гидрофобную шламовую фракцию [8; 9].

Методология и методы исследования. Для установления интенсивности закрепления шламов на поверхности алмазов применялась методика электронно-зондового рентгеноспектрального анализа с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3 LMU, оснащённого рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Advanced Aztec Energy IE350 на базе детектора X-MAXN компании Oxford Instruments, Ltd. [15].

Для установления влияния шламов на показатели пенной сепарации поставлены опыты по пенной сепарации смеси алмазов крупностью 0,6–0,8 мм и кимберлита крупностью 1–1,5 мм в лабораторной установке пенной сепарации. При проведении опытов поддерживался постоянный реагентный режим (расход собирателя – 900 г/т, полифосфата натрия – 150 г/т, концентрация ОПСБ – 60 мг/л). После эксперимента продукты высушивались и разделялись на сите с размером отверстий 1 мм. Из класса 1,0 мм извлекались алмазы, проводились их взвешивание и расчёт баланса. Шламы отбирались после отстаивания промышленной оборотной воды и добавлялись в операцию кондиционирования питания пенной сепарации с собирателем.

Промышленные испытания режима и схем осветления оборотных вод цикла пенной сепарации проводились в отделении пенной сепарации обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОКа.

Обсуждение полученных результатов.

Исследования состояния поверхности и флотуемости алмазов. Для установления роли шламов в процессе пенной сепарации поставлена серия опытов, включающих кондиционирование алмазов оборотной водой цикла пенной сепарации с различным содержанием шламов. Для этого в кимберлитовую навеску перед операцией кондиционирования с собирателем в определённой пропорции (1–5 %) к навеске кимберлита добавляли шламы, отобранные ранее из осадка операции осветления оборотных вод на обогатительной фабрике № 3 Мирнинского ГОКа.

После обработки алмазов в необесшламленной оборотной воде проводилось исследование состава минеральных покрытий на поверхности нескольких специально

отобранных алмазов с применением метода растровой рентгеноэлектронной спектроскопии [15]. Затем проводились добавка реагента собирателя, кондиционирование навески, а обработанная проба загружалась в лабораторный пенный сепаратор.

Результаты экспериментов по проведению техногенной гидрофилизации алмазов в необесшламленной оборотной воде показали, что перемешивание алмазов с навеской кимберлита и шламов в технической воде ведёт к закреплению шламов на поверхности алмазов. Анализ изображений поверхности алмазов (рис. 1а) и спектров (рис. 1б) показывает, что основу покрытия составляют алюмосиликатные минералы кальция и магния, что соответствует составу шламов, извлечённых из оборотной воды отделения пенной сепарации.

Результаты измерений элементного состава поверхности алмазных кристаллов (по суммарным спектрам карты; табл. 1) показали, что при повышении массовой доли шламов в кимберлитовой пробе наблюдаются пропорциональное увеличение массовой доли элементов – компонентов минеральных покрытий, уменьшение поверхностной концентрации атомов углерода, пропорциональной доле свободной поверхности алмаза [13].

Результаты флотационных опытов показали, что увеличение массовой доли шламов в навеске более 0,5 % ведёт к уменьшению флотуемости алмазов (см. табл. 1). Статистический анализ результатов экспериментов, выполненный путём оценки тесноты связи извлечения алмазов в процессе пенной сепарации и содержаний элементов в поверхностном слое алмаза, позволяет сделать заключение о наличии устойчивой связи ($R^2=0,97$) между приведёнными параметрами, что подтверждает вывод о том, что закрепление шламовых покрытий на поверхности алмазов является основной причиной снижения их флотуемости [4].

Выбор режима осветления оборотных вод цикла пенной сепарации. Причиной накопления шламов в оборотной воде является как их привнесение с исходным питанием пенной сепарации в классе от -1,0 до + 0,5 мм, так и снижение эффективности операции осветления оборотной воды [9]. Как показано в одной из работ [6], увеличение концентрации шламов в оборотной воде более 7 г/л приводит к уменьшению скорости их осаждения и, соответственно, к снижению эффективности осветления оборотной воды.

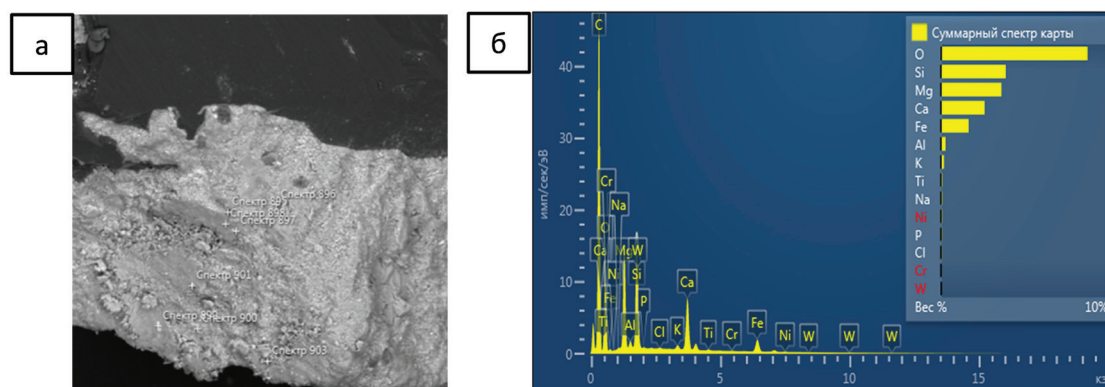


Рис. 1. Изображение (а) и результаты (б) электронно-зондового рентгеноспектрального анализа состава поверхности алмаза со шламовым покрытием / **Fig. 1.** Image (a) and results (b) of electron probe X-ray spectral analysis of the composition of a diamond surface with a slime coating

Таблица 1 / Table 1

Изменения состава поверхности и флотуемости алмазов в лабораторном пенном сепараторе, % / Changes in the surface composition and floatability of diamonds in a laboratory foam separator, %

Массовая доля шламов в питании / Mass fraction of slime in the feeding	Концентрация элементов на поверхности / Concentration of elements on the surface						Извлечение / Recovery
	C	Ca	Mg	Fe	Si	Al	
0	91,6	1,76	0,42	0,02	2,45	0,54	92,6
0,5	90,9	1,87	0,46	0,02	2,57	0,58	92,4
1	89,4	2,12	0,53	0,02	3,05	0,69	89,1
2	83,4	2,54	0,66	0,03	4,26	0,86	84,4
3	80,6	3,08	0,78	0,03	5,53	1,14	78,0
5	76,2	3,55	0,87	0,04	6,75	1,45	72,5

Ещё одним источником накопления шламов является органо-воздушно-минеральный продукт, отделяемый от концентрата пенной сепарации, который представляет собой агрегаты гидрофобных минералов различной крупности и пузырьков воздуха, скреплённых мазутом. Возврат данного продукта в технологический процесс достаточно актуален, поскольку с ним происходит возврат основной массы аполярного собирателя [7]. Однако при возврате этого продукта в основную операцию происходит накопление гидрофобных шламов, ухудшающих режим флотации и пенной сепарации. Следовательно, условием выбора технологии и схемы кондиционирования оборотных вод выбрана возможность отделения флотационных реагентов от гидрофобных шламов. Перспективным путём разрушения органо-воздушно-минеральных агрегатов является использование высокотурбулентных режимов классификации в центробежном гравитационном поле, позволяющих диспергировать данный продукт и отделить зёрна гидрофобных минералов

кимберлита от капель аполярного собирателя.

В предлагаемом режиме и схеме для эффективного обесшламливания оборотной воды пенной сепарации предложено использовать операцию гидроциклонирования в сочетании с флотогравитационным осветлением в трёхпродуктовом осветлителе ОФГ.

Принципиальная схема процесса дезагрегирования органо-воздушно-минеральных комплексов, представленная на рис. 2, включает стадии пространственной стратификации сред с различной плотностью в центробежном поле и последующей их сепарации в разделяемых потоках: крупных минеральных зёрен – в песковый продукт, воздушных пузырьков и капель собирателя – в слив гидроциклонирования.

На заключительной стадии осветления оборотной воды целесообразно использовать технологию флотоклассификации в трёхпродуктовом сепараторе (осветлителе), обеспечивающем получение водной фазы, очищенной от осаждающихся и всплывающих загрязнений [8; 9].

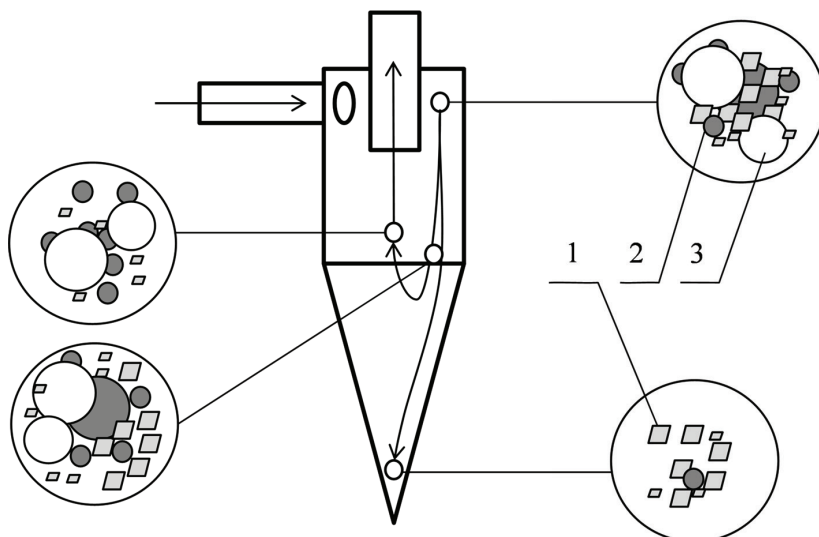


Рис. 2. Схема дезагрегирования и разделения воздушной, органической и минеральной фаз агрегата в гидроциклоне:

1 – минеральные зёрна;
2 – капли аполярного собирателя;
3 – воздушные пузырьки /

Fig. 2. Scheme of disaggregation and separation of the air, organic and mineral phases of the aggregate in a hydrocyclone: 1 – mineral grains; 2 – drops of the apolar collector; 3 – air bubbles

В осветлителе типа ОФГ (конструкция института «Якутнипроалмаз») объединены различные методы очистки оборотной воды. Внутреннее пространство сепаратора разделено наклонными перегородками на две зоны, соединённые по принципу сообщающихся сосудов (рис. 3). В верхней зоне сепаратора протекает флотационная,

а в нижней – гравитационная очистка оборотной воды. При движении к разгрузочному порогу основная масса шлам оседает и выводится из аппарата через нижний шпикастен. Для удаления наиболее тонких шламовых классов в аппарате используется приспособление для тонкослойного разделения [2].

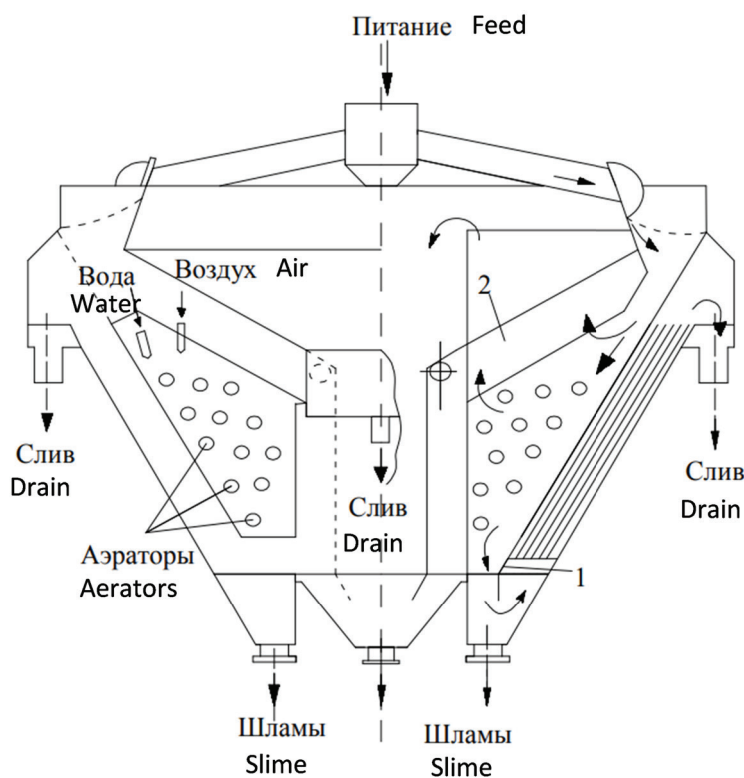


Рис. 3. Трёхпродуктовый флотоклассифицирующий осветлитель ОФГ:

1 – поперечные перегородки;
2 – продольные перегородки /
Fig. 3. Three-product flotation-classifying clarifier OFG: 1 – transverse partitions; 2 – longitudinal partitions

Воздушно-органический продукт извлекается из оборотной воды как за счёт естественного всплывания под действием выталкивающей силы, так и после закрепления на пузырьках, дополнительно подаваемого в сепаратор воздуха. Протекающий одновременно процесс пенного фракционирования, основанный на селективной адсорбции растворённых и диспергированных органических реагентов веществ на поверхности газовых пузырьков, обеспечивает извлечение и перевод в пенный продукт вспенивателя [17]. Образовавшаяся пена, обогащённая вспенивателем и собирателем, возвращается в технологический процесс. Извлечение воздушно-органического продукта проводится в близком к ламинарному режиме, что достигается размещением внутри камеры успокоительных решёток и пластин.

Совершенствование схемы осветления оборотной воды. Полученные результаты исследований применены для оптимизации схемы и режима осветления оборотной воды на обогатительной фабрике № 3 Мирнинского ГОКа. В исходной (проектной) схеме для удаления шламов из оборотной воды отделения пенной сепарации использовались сгустители Ц-9. Питанием сгустителей является слив классификаторов 1КСН-12, обезвоживающих хвосты пенного сепаратора ПФМ-10. Слив сгустителей Ц-9 направляется

в зумпф оборотной воды, а пески после обезвоживания в гидроциклоне ГЦ-500 выносятся в отвал.

Разработанная схема удаления и очистки оборотной воды хвостового продукта пенной сепарации, представленная на рис. 4, базируется на использовании гидроциклонов и флотоклассифицирующего осветлителя ОФГ-1,6М. При работе отделения пенной сепарации хвосты пенного сепаратора насосом закачиваются в батарею гидроциклонов ГЦР-500. Пески гидроциклонов поступают на грохот ГИЛ -31. Подрешётный продукт крупностью менее 0,8 мм направляется в отвал, а надрешётный продукт крупностью более 0,8 мм – в циркуляцию. Сливы гидроциклонов направляются во флотоклассификационный осветлитель ОФГ-1,6. Жидкая фаза – осветлённая вода направляется в зумпф оборотной воды цикла пенной сепарации. Пески сепаратора вместе с подрешётным продуктом грохочения направляются через пробоборник в зумпф хвостов фабрики и далее в отвал. Пенный продукт осветлителя ОФГ-1,6 направляется в питание машины пенной сепарации ПФМ-10.

Для обесшламливания оборотной воды на участке доводки алмазосодержащего концентрата предусмотрено использование гидроциклонов ГЦР-500 и флотоклассифицирующего осветлителя ОФГ2-1,2М (рис. 5).

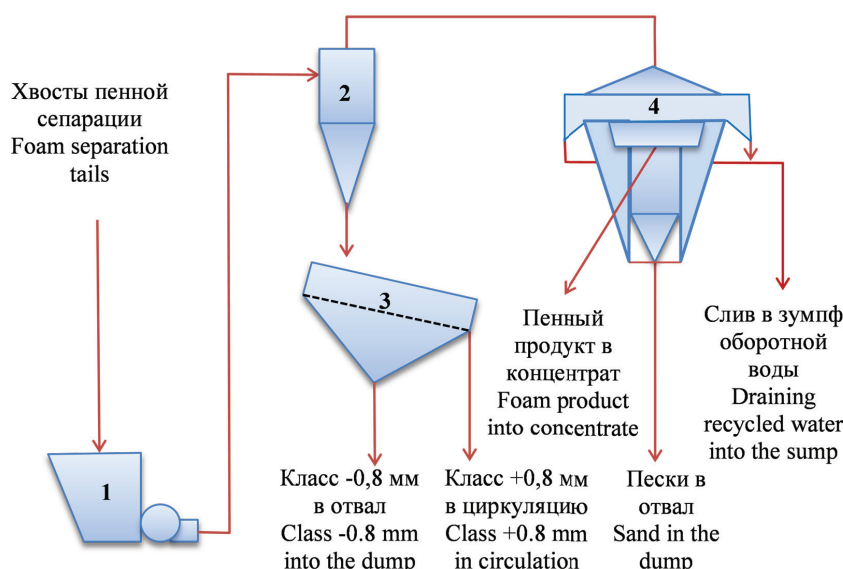


Рис. 4. Разработанная схема обесшламливания водной фазы хвостового продукта пенной сепарации: 1 – зумпф хвостов пенной сепарации с насосом; 2 – гидроциклон; 3 – грохот; 4 – осветлитель флотоклассифицирующий / **Fig. 4.** The developed scheme of the aqueous phase deslamation of the tail product of foam separation: 1 – sump of foam separation tails with a pump; 2 – hydrocyclone; 3 – screen; 4 – flotation-classifying clarifier

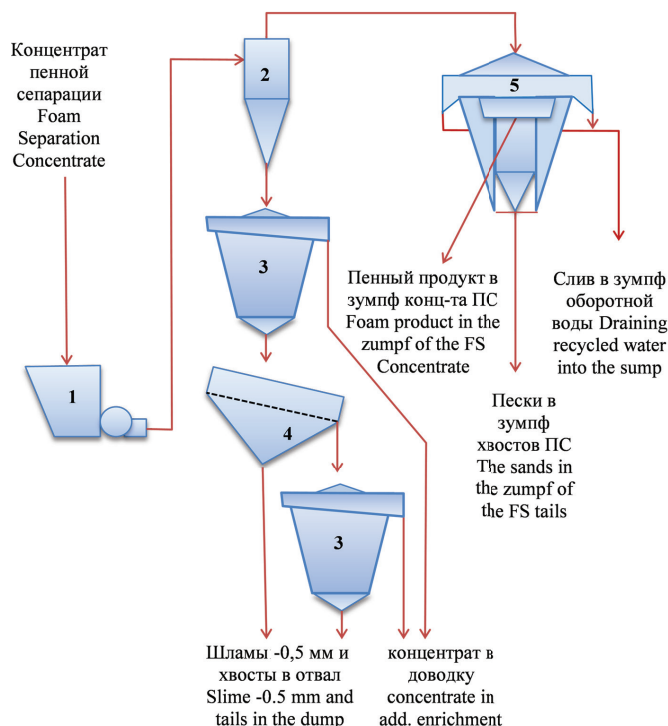


Рис. 5. Разработанная схема обесшламливания оборотной воды – водной фазы концентрата пенной сепарации (ПС): 1 – зумпф с насосом; 2 – гидроциклон; 3 – машина пленочной флотации; 4 – грохот; 5 – осветлитель флокклассифицирующий / **Fig. 5.** The developed scheme of recycled water desalination – water phase of foam separation (FS) concentrate: 1 – sump with pump; 2 – hydrocyclone; 3 – thickener; 4 – surface flotation machine; 5 – flotation-classifying clarifier

Концентраты пенного сепаратора ПФМ-5М поступают в цех доводки, где первоначально обезвоживаются в гидроциклоне ГЦ-150. Пески гидроциклона направляются на дальнейшую флотационную доводку в машину плёночной флотации МП-5М. Сливы гидроциклонов направляются в флокклассифицирующий осветлитель ОФГ2-1,2М. Поверхностно-активные вещества, гидрофобные частицы, поступающие во флотационную зону осветлителя ОФГ2-1,2М, вместе флотируются в пенный продукт. Наиболее крупнозернистая и гидрофильная часть твёрдой фазы осаждается и выводится из аппарата через песковые насадки. Далее осветляемая вода проходит по пакетам наклонных пластин, где происходит тонкослойное разделение жидкой и твёрдой фаз. Твёрдая фаза перемещается вниз по наклонной поверхности пластин и выгружается из аппарата через патрубки. Жидкая фаза, представляющая собой осветлённую воду, направляется в зумпф оборотной воды пенной сепарации. Пески осветлителя направляются в зумпф концентрата винтовой сепарации. Пенный продукт осветлителя ОФГ2-

1,2М направляется в зумпф питания пенной сепарации.

Испытания и внедрение режимов и схемы осветления оборотных вод. Разработанные схемы обесшламливания оборотной воды прошли промышленные испытания в отделении пенной сепарации обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОКа.

В период проведения испытаний поддерживались постоянный расход свежей воды и степень замыкания водооборота около 76 %. Результаты испытаний показали, что применение разработанной схемы позволяет существенно уменьшить концентрацию шламов в оборотной воде (табл. 2).

Расход электроэнергии, потребляемой оборудованием, уменьшился на 5 %.

Достигнутое снижение концентрации шламов позволило уменьшить расход свежей воды в операции пенной сепарации и довести степень замыкания водооборота до 85 %. За счёт таких изменений удалось снизить расходы флотационных реагентов на 7–10 % и повысить извлечение алмазов в концентрат на 1,2 % (табл. 3).

Таблица 2 / Table 2

Результаты испытаний разработанной схемы и режима обесшламливания оборотной воды (ОВ) цикла пенной сепарации (ПС) / Test results of the developed scheme and mode of desliming of circulating water (CW) of the foam separation cycle (FS)

Применяемая схема / Scheme used	Расход ОВ, м ³ /ч / CW consumption, m ³ /h	Расход энергии, кВтч/м ³ / Energy consumption, kWh/m ³	Концентрация шламов в ОВ, г/л / Slime concentration in CW, g/l
<i>Узел осветления ОВ хвостов ПС / Clarification unit of recycled water of the FS tailings</i>			
Проектная схема / Design scheme	322,6	0,55	17,4
Новая схема / New scheme	321,5	0,54	8,8
<i>Узел осветления ОВ концентрата ПС / Clarification unit of recycled water of FS concentrate</i>			
Проектная схема / Design scheme	18,6	0,94	11,7
Новая схема / New scheme	18,7	0,75	5,6
<i>Общий замкнутый водооборот цикла ПС / General closed water cycle of the foam separation cycle</i>			
Проектная схема / Design scheme	350,5	0,64	16,5
Новая схема / New scheme	350,2	0,61	8,2

Таблица 3 / Table 3

Результаты промышленного освоения разработанной схемы и режима обесшламливания оборотной воды / Test results of the developed scheme and mode of recycled water desliming

Применяемая схема / Scheme used	Расход собирателя – мазута флотского Ф5 / Consumption of the collector – fuel oil of the fleet F5	Расход вспенивателя ОПСБ / Consumption of the OPSB foamer	Извлечение алмазов, % / Diamond recovery, %
Проектная схема / Design scheme	900	33	92,5
Новая схема / New scheme	840	30	93,7

Выводы. Показано, что в присутствии шламовых классов кимберлита происходит гидрофилизация алмазов шламовыми продуктами, которая существенно снижает их флотируемость. Основной причиной увеличения концентрации шламов является снижение эффективности операции осветления оборотной воды, а также накапливание в оборотной воде агрегатов гидрофобных минералов кимберлита различной крупности и пузырьков воздуха, скреплённых мазутом. Для разрушения органо-воздушно-минеральных агрегатов предложено использовать высокотурбулентный режим классификации в центробежном гравитационном поле, позволяющий диспергировать воздушно-органический-минеральный продукт и отделить зёрна гидрофобных минералов кимберлита от капель аполярного собирателя. На заключительной стадии осветления оборотной воды

предложено использовать технологию флотоклассификации в трёхпродуктовом осветлителе, обеспечивающем получение водной фазы, очищенной от осаждающихся и всплывающих фракций.

Разработаны схемы обесшламливания оборотной воды отделения пенной сепарации, базирующиеся на использовании последовательно установленных гидроциклонов и флотоклассифицирующих осветлителей ОФГ-1,6 и ОФГ2-1,2М. Данные схемы обесшламливания оборотной воды испытаны и внедрены в отделении пенной сепарации обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОКа. Достигнутое снижение в 2 раза концентрации шламов в оборотной воде позволило повысить степень замыкания водооборота до 85 %, снизить расход свежей воды и флотационных реагентов на 7–10 %, повысить извлечение алмазов в концентрат на 1,2 %.

Список литературы

1. Айгистов М. Р., Герасимов Е. Н., Бондаренко И. Ф., Зырянов И. В. Современные технологии при добыче и переработке алмазосодержащего сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5. С. 6–21. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_6.
2. Бауман А. В. Сгущение и водооборот: в 3 ч. Ч. 3. Тонкослойные сгустители. Новосибирск: Гор-машэкспорт, 2020. 33 с.
3. Верхотуров М. В., Амелин С. А., Коннова Н. И. Обогащение алмазов // Международный журнал экспериментального образования. 2012. № 2. С. 61–67.

4. Двойченкова Г. П., Ковальчук О. Е., Подкаменный Ю. А., Тимофеев А. С. Экспериментальное исследование состава кимберлитовых руд и механизма формирования минеральных образований на поверхности природных алмазов // Горный журнал. 2017. № 11. С. 45–51. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.09.
5. Злобин М. Н. Технология крупнозернистой флотации при обогащении алмазосодержащих руд // Горный журнал. 2011. № 1. С. 87–89.
6. Морозов В. В., Двойченкова Г. П., Коваленко Е. Г., Тимофеев А. С. Обоснование степени замыкания водооборота в цикле пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12. С. 39–47. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_5.
7. Морозов В. В., Коваленко Е. Г., Двойченкова Г. П., Чуть-Ды В. А. Выбор температурных режимов кондиционирования и флотации алмазосодержащих кимберлитов компаундными собирателями // Горные науки и технологии. 2022. Т. 7, № 4. С. 287–297. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-10-23.
8. Морозов Ю. П., Интогарова Т. И., Валиева О. С., Бекчурина Е. А. Преимущества применения флотоклассификаторов в замкнутом цикле измельчения. Горный журнал. 2019. № 2. С. 51–56. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.10.
9. Морозов Ю. П., Хамидулин И. Х., Фалей Е. А. Разработка и испытания турбулизационных центробежных сепараторов // Горный журнал. 2015. № 5. С. 58–62. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.12.
10. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Ковальчук О. Е., Тимофеев А. С. Особенности состава поверхности гидрофильных алмазов и их роль в процессе пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 6. С. 173–181.
11. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Ковальчук О. Е. Особенности фазового минерального состава поверхности алмазных кристаллов, извлекаемых из хвостов обогащения алмазосодержащего сырья // Инновации и инвестиции. 2013. № 7. С. 264–267.
12. Chanturiya V. A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia // Proceedings of the 29th International Mineral Processing Congress. Moscow, 2019. Pp. 3–12.
13. Gengenbach T., Major G., Linford M., Easton P. Practical guides for x-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Interpreting the carbon 1s spectrum. Текст: электронный // J. Vac. Sci. Technol. 2021. URL: <https://doi.org/10.1116/6.0000682> (дата обращения: 12.01.2024).
14. Hou D. X., Cui B. Y., Zhang H., Zhao Q., Ji A. K., Wei D. Z., Feng Y. Q. Designing the hydrocyclone with flat bottom structure forweakening bypass effect. Powder Technol. 2021. No. 394. Pp. 724–734. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.09.001.
15. Mahoney J., Monroe C., Swartley A. M. Surface analysis using X-ray photoelectron spectroscopy // Spectroscopy Letters: an International Journal for Rapid Communication. 2020. Vol. 53, no. 10. Pp. 726–736. DOI: 10.1080/00387010.2020.1824197.
16. Phiri T., Tapa C., Nyati R. Effect of Desliming on Flotation Response of Kansanshi Mixed Copper Ore. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2019, no. 7, pp. 193–212. DOI: 10.4236/jmmce.2019.74015.
17. Stevenson P., Li X. Foam Fractionation: Principles and Process Design. CRC Press, 2014. 206 p.
18. Westhuyzen P., Bouwer W., Jakins A. Current trends in the development of new or optimization of existing diamond processing plants, with focus on beneficiation // Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014. Vol. 114. Pp. 537–546.

References

1. Aigistov M. R., Gerasimov E. N., Bondarenko I. F., Zyryanov I. V. Modern technologies in the extraction and processing of diamond-containing raw materials. Mining Information and Analytical Bulletin, no. 5, pp. 6–21, 2022. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_6. (In Rus.)
2. Bauman A. V. Thickening and water circulation: in 3 parts. Part 3. Thin-layer thickeners. Novosibirsk: Gormasheport, 2020. 33 p. (In Rus.)
3. Verkhoturov M. V., Amelin S. A., Konnova N. I. Diamond enrichment. International Journal of Experimental Education, no. 2, pp. 61–61, 2012. (In Rus.)
4. Dvoichenkova G. P., Kovalchuk O. E., Podkamenny Yu. A., Timofeev A. S., Experimental study of the composition of kimberlite ores and the mechanism of formation of mineral formations on the surface of natural diamonds. Mining Journal, no. 11, pp. 45–51, 2017. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.09. (In Rus.)
5. Zlobin M. N. Technology of coarse-grained flotation in the enrichment of diamond-bearing ores. Mining Journal, no. 1, pp. 87–89, 2011. (In Rus.)
6. Morozov V. V., Dvoichenkova G. P., Kovalenko E. G., Timofeev A. S. Substantiation of the degree of water circulation closure in the foam separation cycle of diamond-containing kimberlites. Mining Information and Analytical Bulletin, no. 12, pp. 39–47, 2022. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_12_0_5. (In Rus.)
7. Morozov V. V., Kovalenko E. G., Dvoichenkova G. P., Slightly V. A. The choice of temperature modes of conditioning and flotation of diamond-containing kimberlites by compound collectors. Mining Sciences and Technologies, vol. 7, no. 4, pp. 287–297, 2022. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-10-23. (In Rus.)

8. Morozov Yu. P., Intogarova T. I., Valieva O. S., Bekchurina E. A. Advantages of using flotation classifiers in a closed grinding cycle. *Mining Journal*, no. 2, pp. 51–56, 2019. DOI: 10.17580/gzh.2019.02.10. (In Rus.)
9. Morozov Yu. P., Khamidulin I. H., Faley E. A. Development and testing of turbulization centrifugal separators. *Mining Journal*, no. 5, pp. 58–62, 2015. DOI: 10.17580/gzh.2015.05.12. (In Rus.)
10. Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., Kovalchuk O. E., Timofeev A. S. Features of the surface composition of hydrophilic diamonds and their role in the process of foam separation of diamond-containing kimberlites. *Physical and Technical Problems of Mineral Development*, no. 6, pp. 173–181, 2015. (In Rus.)
11. Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., Kovalchuk O. E. Features of the phase mineral composition of the surface of diamond crystals extracted from tailings of diamond-containing raw materials. *Innovation and Investment*, no. 7, pp. 264–267, 2013. (In Rus.)
12. Chanturia V. A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia/ *Proceedings of the 29th International Congress on Mineral Processing. Moscow, 2019. Pp. 3–12. (In Eng.)*
13. Gengenbach T., Major G., Linford M., Easton S. Easton C. Practical guides for x-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Interpreting the carbon 1s spectrum. 2021. Web. 12.01.2024. <https://doi.org/10.1116/6.0000682>. (In Eng.)
14. Hou D. H., Cui B. Y., Zhang H., Zhao K., Ji A. K., Wei D. Z., Feng Y. K. Designing the hydrocyclone with flat bottom structure forweakening bypass effect. *Powder Technol. No. 394*, pp. 724–734, 2021. DOI:10.1016/j.powtec.2021.09.001. (In Eng.)
15. Mahoney J., Monroe S., Swartley A. M. Surface analysis using X-ray photoelectron spectroscopy // *Spectroscopy Letters: an International Journal for Rapid Communication*. Vol. 53, no. 10, pp. 726–736, 2020. DOI:10.1080/00387010.2020.1824197. (In Eng.)
16. Phiri T., Tapa S., Nyati R. Effect of Desliming on Flotation Response of Kansanshi Mixed Copper Ore. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, no. 7, pp. 193–212, 2019. DOI: 10.4236/jmmce.2019.74015. (In Eng.)
17. Stevenson P., Lee H. *Foam Fractionation: Principles and Process Design*. CRC Press, 2014, 206 p. (In Eng.)
18. Westhuizen P., Bover U., Jakins A. Current trends in the development of new or optimization of existing diamond processing plants, with focus on beneficiation/ *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, no. 114, pp. 537–546, 2014. (In Eng.)

Информация об авторе

Коваленко Евгений Геннадьевич, канд. техн. наук, главный инженер, «Якутнипроалмаз», Акционерная компания «АЛРОСА», г. Мирный, Россия; kovalenkoeg@gmail.ru. Область научных интересов: исследования, моделирование и разработка технологий обогащения алмазосодержащих кимберлитов.

Information about the author

Kovalenko Evgeny G., Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer, Yakutnioproalmaz Institute, Alrosa Joint Stock Company "ALROSA", Mirny, Russia; kovalenkoeg@gmail.ru. Research interests: research, modeling and development of technologies for the enrichment of diamond-containing kimberlites.

Для цитирования

Коваленко Е. Г. Совершенствование схемы и режима внутреннего водооборота пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2024. Т. 30, № 2. С. 62–71. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-62-71.

For citation

Kovalenko E. G. Improvement of the Scheme and Regime of Internal Water Circulation of Foam Separation of Diamond-Containing Kimberlites // *Transbaikal State University Journal*. 2024. Vol. 30, no. 2. P. 62–71. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-62-71.