

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СЕПАРАЦИИ ТРУДНООБОГАТИМОГО АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ КОРЕННЫХ, РОССЫПНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В. А. Чантурия¹, Г. П. Двойченкова^{1,2}, Е. Л. Чантурия³, А. С. Тимофеев¹

¹Институт проблем комплексного освоения недр им. акад. Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: dvoigr@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

²Мирнинский политехнический институт (филиал)
Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова,
ул. Тихонова, 5, 678174, г. Мирный, Россия

³Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС",
Ленинский проспект, 4, 117049, г. Москва, Россия

Представлены результаты исследований современных схем технологии обогащения алмазосодержащего кимберлитового сырья сложного вещественного состава. Теоретически и экспериментально обоснованы методы модифицирования свойств минеральных компонентов с целью повышения селективности их разделения в процессах сепарации алмазосодержащего материала. Для слабо- и аномально люминесцирующих алмазов подтверждена эффективность использования люминофорсодержащих композиций, обеспечивающих модифицирование спектрально-кинетических характеристик алмазных кристаллов до значений, позволяющих регистрировать и извлекать их в действующих схемах рентгенолюминесцентной сепарации. Показана эффективность комбинированного использования ультразвуковых, термических и электрохимических методов очистки алмазных кристаллов от гидрофилизирующих поверхностных образований для увеличения извлечения алмазов в концентраты липкостной и пенной сепараций. Разработан способ повышения коррозионной устойчивости ферросилиция за счет создания на его поверхности методом азотирования нитридной оболочки, не взаимодействующей с коррозионно-активными элементами водной среды. Экспериментально обоснована магнитная сепарация в качестве метода повышения качества первичных концентратов тяжелосредней сепарации алмазосодержащего материала за счет удаления из него до 95.8 % магнитных минералов.

Алмазы, минералы, рентгенолюминесцентная, тяжелосредняя сепарации, липкостная сепарация, пенная сепарация, магнитная сепарация, ультразвуковые, термические и электрохимические способы, азотированный ферросилиций, черновой концентрат

DOI: 10.15372/FTPRPI20220510

В современных условиях развития алмазодобывающего комплекса России в качестве основного направления повышения его эффективности принята необходимость вовлечения в переработку труднообогатимого алмазосодержащего сырья коренных и россыпных место-

рождений, а также техногенных образований, характеризующихся низким содержанием ценного компонента (алмазных кристаллов) и сложным вещественным составом, в котором определяется высокое содержание вторично измененных минералов кимберлита [1 – 4].

Стадиальность схем переработки алмазосодержащего сырья, применяющихся на современных обогатительных фабриках, обусловлена большим диапазоном крупности извлекаемых алмазов (0.2 – 50 мм) и необходимостью обеспечения сохранности алмазных кристаллов при максимальном их извлечении в соответствующие концентраты.

Современная технология переработки кимберлитовых руд коренных, россыпных и техногенных месторождений АК “АЛРОСА” предусматривает применение первичной операции тяжелосредной сепарации (ТСС), концентрат которой поступает в схему доводки, представляющей совокупность операций рентгенолюминесцентной (РЛС), липкостной (ЛС) и пенной (ПС) сепараций [5]. Полнота извлечения алмазов в концентраты обусловлена как свойствами алмазных кристаллов и сопутствующих минералов кимберлита, так и параметрами качества алмазосодержащих продуктов, поступающих в схему доводки, основными из которых являются содержание алмазов в концентрате и выход в концентрат кимберлитового материала.

Эффективность процессов сепарации алмазосодержащего сырья рассматриваемого состава обеспечивается:

- максимальной селективностью разделения алмазов и сопутствующих минералов;
- снижением потерь алмазных кристаллов с хвостовыми продуктами обогащения;
- стабилизацией свойств ферросилициевой суспензии и снижением потерь ферросилициевых гранул в процессах тяжелосредной сепарации;
- снижением выхода кимберлитового материала и высоким качеством первичных концентратов ТСС, обеспечивающих максимальное извлечение алмазов в процессах сепарации схемы доводки алмазосодержащих продуктов.

Данными отдела технического контроля обогатительных алмазоизвлекающих фабрик и результатами исследований, выполненных институтами ИПКОН РАН, НИГП и “Якутнипроалмаз” АК “АЛРОСА”, установлено:

- алмазные кристаллы, не извлекаемые в схемах рентгенолюминесцентной сепарации, характеризуются аномальными параметрами природной люминесценции, значения которых не находятся в пределах параметров настройки сепараторов и не позволяют детектировать данные кристаллы как алмазы. Стоимость алмазных кристаллов крупнее 2 мм составляет в условиях современного рынка около 80 % от общей стоимости товарной продукции, что делает задачу достижения максимального извлечения алмазов со слабой и аномальной светимостью в действующих схемах РЛС весьма перспективной;

- алмазные кристаллы, не извлекаемые в схемах процессов липкостной и пенной сепарации, характеризуются наличием на их поверхности гидрофилизирующих образований, снижающих природные гидрофобные свойства алмазов и эффективность их извлечения в концентраты. Максимальные потери алмазов в процессах липкостной и пенной сепарации алмазосодержащего сырья, составляющие в денежном выражении свыше 21 млн долл в год, делают актуальной проблему достижения их максимального извлечения [7, 6];

- коррозионная устойчивость ферросилиция, используемого для приготовления ферросилициевой суспензии, обуславливает эффективность и экономические показатели процесса тяжелосредной сепарации. Окисление и разрушение ферросилициевых гранул в условиях контакта с коррозионно-активными элементами водной среды приводят к потерям дорогостоящего ферросилиция (значение которых достигает 750 г/т исходного материала), что делает актуальной проблему разработки методов повышения коррозионной устойчивости гранул ферросилиция в действующих технологических процессах ТСС [8 – 10];

- высокое качество алмазосодержащих концентратов первичного процесса ТСС, обусловленное максимальным содержанием алмазных кристаллов и минимальным выходом кимберлитового материала, обеспечивает эффективность процессов их окончательной доводки в операциях РЛС, ЛС и ПС. Перечисленные процессы сепарации являются заключительными в общей технологической схеме переработки исходного сырья, что переводит потери алмазных кристаллов с хвостами указанных операций либо в класс “циркуляционной нагрузки”, снижающий степень сохранности неизвлеченных алмазных кристаллов, либо в класс “невозвратных”, поступающих в отвальные хвосты обогащения. Данный факт делает решение задачи повышения эффективности процессов доводки за счет достижения максимального качества концентратов первичного процесса ТСС достаточно актуальным.

Для интенсификации процессов сепарации труднообогатимого алмазосодержащего сырья коренных, россыпных и техногенных месторождений выполнен цикл теоретических и экспериментальных исследований, содержащий решение задач по изучению свойств разделяемых минеральных компонентов, минерального состава первичных концентратов и гранул ферросилиция ТСС, извлеченных из ферросилициевой суспензии и продуктов обогащения процесса ТСС.

ПРОЦЕССЫ РЕНТГЕНОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СЕПАРАЦИИ

Согласно данным НИГП АК “АЛРОСА”, эффективно извлекаются алмазы, в которых содержание азота находится в интервале средних значений (50–800 ppm). Выявлена группа алмазных кристаллов, не извлекающихся рентгенолюминесцентными сепараторами в условиях использования параметров их действующих настроек, что обусловлено либо отсутствием в этих алмазах центров люминесценции, либо наличием аномально высоких значений центров люминесценции. Данные кристаллы соответственно отнесены к группам “низкоазотных” (менее 50 ppm) и “высокоазотных” (более 800 ppm).

Экспериментально установлено соотношение органических и неорганических люминофоров, сочетание которых на поверхности кристаллов обеспечивает необходимые для их регистрации кинетические и спектральные параметры рентгенолюминесценции алмазов. Разработан способ приготовления на их основе люминофорсодержащих эмульсий, обладающих избирательной способностью к закреплению на поверхности алмазов [11, 12]. Для исследования характера и эффективности закрепления люминофорсодержащей композиции на поверхности алмазов и минералов использовался метод ультрафиолетовой визиометрии с помощью люминоскопа “Луч-1Ф” и микроскопа Микромед 3 ЛЮМ с фотокамерой.

Лабораторные эксперименты, выполненные в условиях обработки люминофорсодержащей эмульсией отдельных алмазов, позволили определить механизм закрепления люминофоров на поверхности алмазных кристаллов. Определен рациональный состав люминофорсодержащей композиции на основе рентгенолюминофора ФЛ-530, антрацена и дизельного топлива (коллектора), позволяющий реализовать эффективное закрепление люминофора на поверхности алмазов. Условием устойчивого закрепления люминофоров на поверхности алмазов является образование агрегатов “алмаз – органический коллектор – люминофор” [13]. На рис. 1 показано полученное в комбинированном освещении (УФ и видимой свет) изображение алмазов и капли люминофорсодержащей композиции на начальном (рис. 1а) и на конечном этапе взаимодействия (рис. 1б). Полученные с использованием микроскопа Микромед 3 ЛЮМ с фотокамерой изображения демонстрируют механизм образования агрегатов “алмаз – органическая фаза – люминофор”.



Рис. 1. Алмазы (1) и люминофорсодержащая композиция (2) в начале (а) и в конце (б) гидрофобного взаимодействия

Максимальная степень закрепления люминофорсодержащей эмульсии на поверхности алмазного кристалла обеспечивается использованием метода повышения гидрофобности неорганических люминофоров класса силикатов и сульфидов цинка путем обработки их солями меди и ионогенными реагентами класса ксантогенатов [14]. Зафиксированный эффект гидрофобных взаимодействий иллюстрируется на рис. 2а изображениями агрегатов кристаллов алмазов с люминофорсодержащей композицией, а также снимком распределения люминофора по поверхности алмаза после удаления (подсушивания) с нее органической составляющей композиции (рис. 2б, в). Изображения минералов, полученные в ультрафиолетовом свете (рис. 2), позволили определить долю поверхности алмазов, занятую люминофором. В зависимости от режимов обработки алмазных кристаллов люминофорсодержащей композицией достигается покрытие люминофорами их поверхности на 15–30 % при максимальных 3–5 % покрытия поверхности минералов кимберлита.



Рис. 2. Изображения агломерата алмаза с люминофорсодержащей фазой (а), подсушенного кристалла обработанного алмаза (б) и распределения люминофора на поверхности обработанного кристалла алмаза (в)

Важным требованием к эффективности разработанной технологии является достаточно высокая селективность процесса взаимодействия люминофорсодержащей композиции в условиях обработки смеси алмазных кристаллов и минералов кимберлита.

Для обеспечения максимальной степени селективности процесса модифицирования поверхности алмазных кристаллов люминофорсодержащими эмульсиями, позволяющей скорректировать параметры светимости алмазов без изменения аналогичных характеристик минералов кимберлита, предложено использовать реагенты-регуляторы класса полифосфатов и поверхностно-активные вещества класса алкилсульфонатов. Эксперименты выполнялись с использованием алмазных кристаллов, “подсаженных” к зернам безалмазного кимберлитового материала. Как видно из рис. 3, дополнительные компоненты при использовании люминофорсодержащей эмульсии обеспечивают высокую селективность закрепления люминофорсодержащей композиции на поверхности алмазных кристаллов.

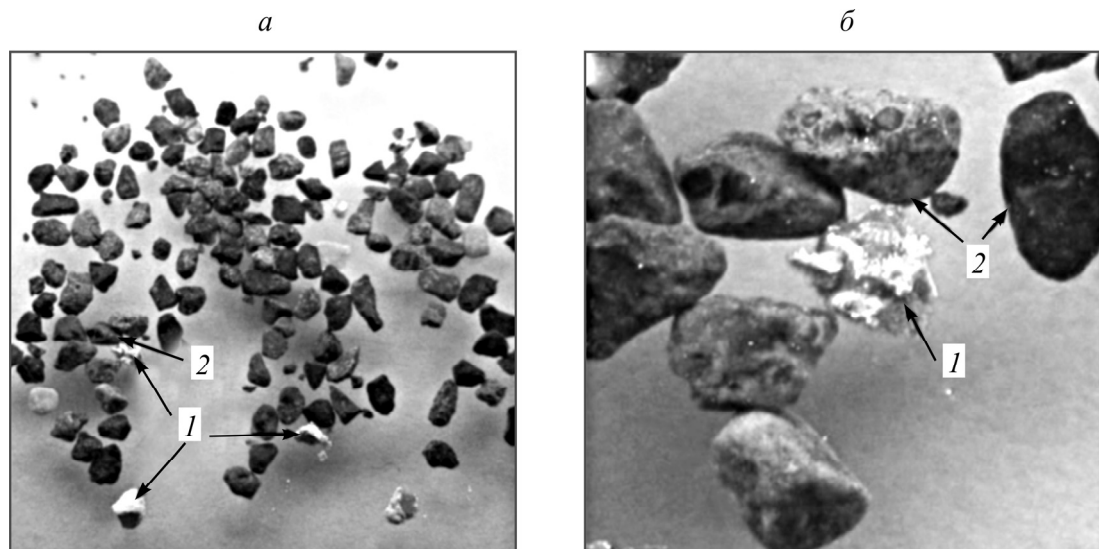


Рис. 3. Смесь кристаллов алмазов (1а) с зернами кимберлита (2а) и увеличенное изображение кристалла алмаза (1б) с закрепившимися люминофорами в процессе обработки смеси кимберлитового материала (2) с “подсаженными” алмазными кристаллами (1)

Выбранный состав композиции люминофорсодержащей эмульсии обеспечивает требуемые параметры спектрально-кинетических характеристик, позволяющие извлекать алмазы с аномальными характеристиками светимости в действующих схемах РЛС. Обработанные эмульсией слабо- и аномально люминесцирующие алмазные кристаллы приобретают необходимые значения спектрально-кинетических характеристик, обеспечивающих в условиях эксперимента их полное извлечение в концентрат. Параметры рентгенолюминесценции зерен кимберлита оставались практически неизменными и не приводили к их извлечению в алмазный концентрат.

Таким образом, установлена технологическая эффективность разработанного способа модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазных кристаллов с помощью люминофорсодержащих композиций, который повышает извлечение слабо- и аномально люминесцирующих алмазов в концентрат действующих схем РЛС.

Реализация метода избирательного закрепления люминофоров на поверхности алмазов позволит дополнительно извлекать в действующих схемах рентгенолюминесцентной сепарации кристаллы с аномальными характеристиками природной люминесценции, количество которых оценивается в пределах 2–6 % от исходного содержания алмазов в месторождении. Разработанная технология отличается применением дешевых отечественных компонентов, простотой и экологической безопасностью их использования. Способ закрепления люминофорсодержащих композиций на поверхности алмазов защищен патентом № 2775307 (в соавторстве с АК “АЛРОСА”).

ПРОЦЕССЫ ЛИПКОСТНОЙ И ПЕННОЙ СЕПАРАЦИИ

На обогатительных фабриках АК “АЛРОСА” липкостная и пенная сепарации применяются в качестве доводочных операций алмазосодержащих концентратов основных процессов обогащения и предназначены для извлечения алмазов класса $-5+2$, $-2+1$ и $-1+0.5$ мм. Эффективность рассматриваемых процессов обусловлена степенью гидрофобности поверхности извлекаемых алмазных кристаллов.

Методами оптической, инфракрасной спектроскопии и методом рентгеноспектрального микроанализа изучена поверхность алмазов, извлеченных из хвостов липкостной и пенной сепарации продуктов переработки труднообогатимого алмазосодержащего сырья месторождений. Исследовались продукты россыпных и техногенных месторождений, характеризующихся высоким содержанием вторичных минералов кимберлита и тонкодисперсных рентгеноаморфных минеральных фаз. На рис. 4 изображены минеральные образования и примазки, обнаруженные на поверхности исследуемых алмазных кристаллов с использованием электронного оптического микроскопа JXA-8800R. Диагностированные минеральные образования характеризуются линейными размерами 0.01 – 5 мм и толщиной 5 – 350 мкм.

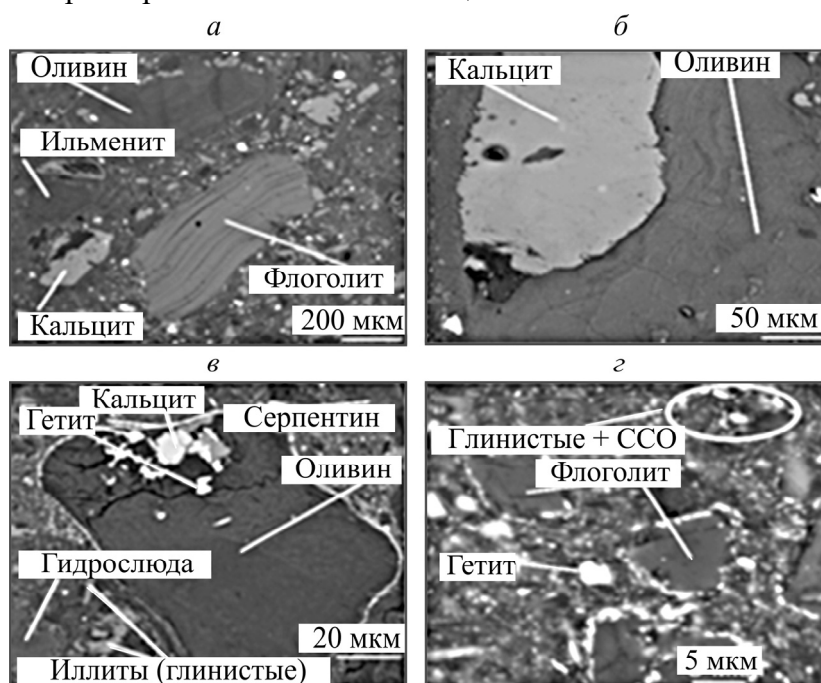


Рис. 4. Гидрофилизирующие образования на алмазах, не извлеченных в концентраты липкостной (а, б) и пенной (в, з) сепарации

Поверхность исследуемых алмазов содержит четыре типа минеральных образований:

- единичные зерна или их дисперсная масса, содержащая силикатные примазки (рис. 5а);
- ожелезнение в виде пленок различной площади и толщины (рис. 5б);
- вещество вторичных минеральных фаз, сконцентрированное в трещинах в виде плотного или рыхлого материала (рис. 5в);
- гидрофильные образования в виде рельефных сростков (рис. 5з) на поверхности кристаллов, извлеченных из хвостов обогащения алмазосодержащего сырья как коренных, так россыпных и техногенных месторождений.

Средний состав примесей на поверхности исследуемых алмазов характеризуется присутствием элементов: Fe, Si, Al, Na, Mg, P, S, Cl, O, Ca, Ti, Mn, Ba, K и химических соединений FeO, SiO₂, Al₂O₃, MgO.

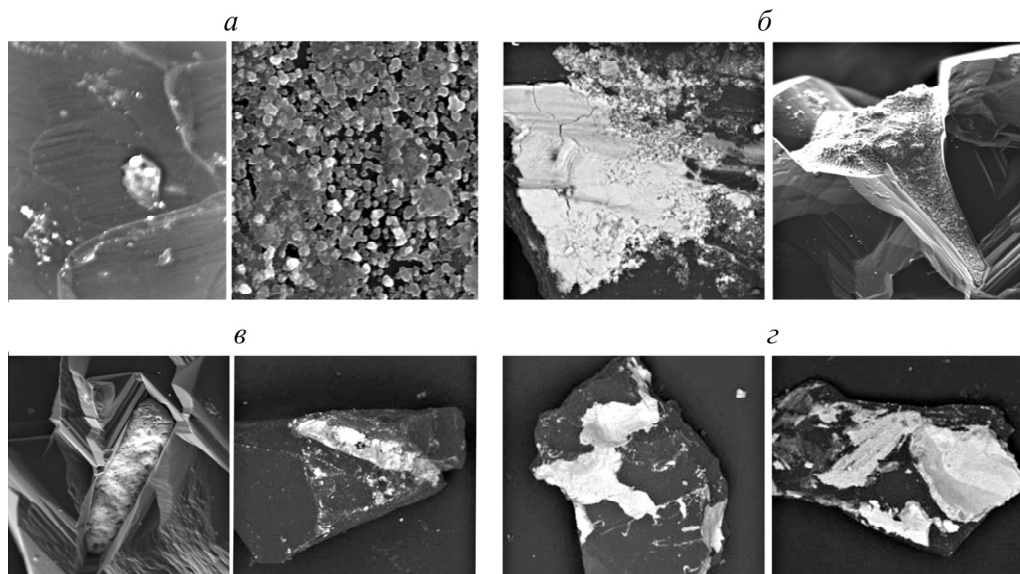


Рис. 5. Внешний вид минеральных образований на поверхности алмазов хвостовых продуктов обогащения: *а* — отдельные и единичные зерна; *б* — сплошная пленка; *в* — рельефные образования в трещине; *г* — рельефные сростки

Линейный размер обнаруженных гидрофилизирующих минеральных образований изменяется от 1 до 120 мкм и соответствует диапазону размеров гидрофилизирующих минеральных образований, диагностированных на поверхности ранее исследованных алмазов, не извлекаемых в концентраты липкостной и пенной сепарации кимберлитовых руд коренных месторождений (16–120 мкм). Элементным анализом поверхностных минеральных образований на алмазах, извлеченных из хвостов переработки алмазосодержащего сырья, выявлены смешанные силикатно-карбонатно-гидроксидные структуры. Однако на поверхности алмазов россыпных и техногенных месторождений в значительно меньшей мере представлены силикаты и карбонаты кальция, алюминия и магния, характерные для коренных месторождений, при более высоких содержаниях кремнезема и соединений железа.

Результатами аналитических исследований установлено, что поверхность алмазов, не извлекаемых методами липкостной и пенной сепарации, аналогична поверхности гидрофильных алмазов, извлеченных из хвостов липкостной и пенной сепарации кимберлитовых руд коренных месторождений и также характеризуется наличием минеральных образований, представленных магниевыми силикатами, карбонатами кальция, магния и железа.

Диагностированные минеральные образования систематизированы в отдельные три группы, учитывающие особенности их состава, строения и свойств:

1) минеральные поверхностные образования диагностированы на алмазах крупностью $-5+2$ мм и представляют собой шламовые смешанные силикатно-карбонатные и алюмосиликатные покрытия, содержащие поры, заполненные водой и отличающиеся от алмазных кристаллов меньшим акустическим сопротивлением. Присутствуют частично тонкослойные гидрофильные пленки (рис. 6а).

Для разрушения, удаления и предотвращения повторного образования на алмазах поверхностных образований данного типа экспериментально обоснован комбинированный метод совместного применения ультразвуковой обработки пульпы и электрохимически обработанной технологической воды, обеспечивающий прирост краевого угла смачивания исследуемых гидрофильных алмазов на 23–27 %;

2) минеральные поверхностные образования диагностированы в основном на алмазах крупностью $-2+1$ мм. Отличается прочной связью с поверхностью алмазного кристалла и кальций-магний-карбонатным составом, характеризующимся высокими показателями коэффициентов термического разрушения [17, 18]. Присутствуют частично тонкослойные гидрофильные пленки (рис. 6б).

Для разрушения, удаления и предотвращения повторного образования на алмазах поверхностных образований данного типа экспериментально обоснован комбинированный метод совместного применения тепловой обработки пульпы и электрохимически обработанной технологической воды, обеспечивающий прирост краевого угла смачивания исследуемых гидрофильных алмазов на 3 %;

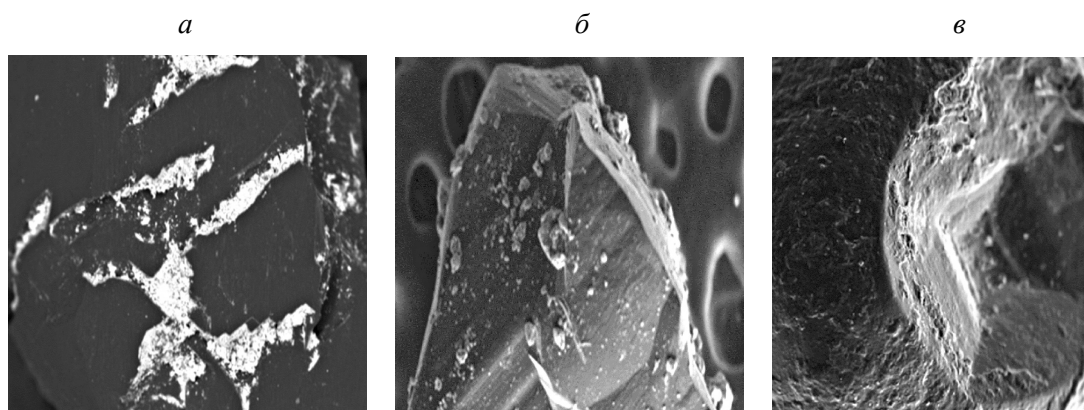


Рис. 6. Минеральные образования первого (а), второго (б) и третьего (в) типов

3) поверхностные минеральные образования диагностированы на алмазах крупностью -1 мм, представлены тонкослойными пленками техногенной гидрофилизации. В разной степени присутствует в минеральных образованиях первой и второй групп на поверхности кристаллов различной крупности (рис. 6в).

Для разрушения, удаления и предотвращения повторного образования на алмазах поверхностных образований данного типа экспериментально обоснован метод использования электрохимически обработанной оборотной воды, свойства которой модифицированы до требуемых параметров и обеспечивают прирост краевого угла смачивания исследуемых гидрофильных алмазов на 25–29 % [19, 20].

С учетом ранее полученных результатов для гидрофилизирующих поверхностных образований обоснованы и экспериментально апробированы схема и последовательность применения физико-химических и электрохимических методов их деструкции и удаления с поверхности алмазных кристаллов в условиях липкостной и пенной сепарации алмазосодержащего сырья как природного, так и техногенного происхождения [5, 16].

Систематизация выполнена с учетом результатов ранее выполненных экспериментов НИР и полученных новых данных минералогических и рентгенографических исследований поверхности алмазов, отобранных из хвостовых продуктов обогащения алмазосодержащего сырья. Представлены результаты по оценке эффективности применения физико-химических и электрохимических воздействий для разрушения и удаления с поверхности исследуемых алмазов гидрофилизирующих минеральных образований.

Обоснованы высокоэффективные комбинированные методы интенсификации процессов липкостной и пенной сепарации алмазосодержащего сырья коренных, россыпных и техногенных месторождений, технологические показатели эффективности которых приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Прирост извлечения алмазов за счет модифицирования поверхностных свойств кристаллов и жидкой фазы рудной пульпы, %

Группа минеральных образований	Методы модифицирования технологических свойств минеральных компонентов и оборотной воды						
	ЭХО* оборотной воды	Оттирка	Тепловая обработка	УЗВ** обработка	ЭХО в цикле оттирки	Тепловая и ЭХО	УЗВ и ЭХО
1	8.1	5.4	0	7.3	12.1	9.4	14.7
2	8.1	3.3	6.4	5.2	10.1	12.7	11.8
3	9.5	4.6	4.2	2.1	9.3	10.3	9.9

*ЭХО — электрохимическая обработка; **УЗВ — ультразвуковая обработка

ПРОЦЕССЫ ТЯЖЕЛОСРЕДНОЙ СЕПАРАЦИИ

В современных схемах обогащения алмазоизвлекающих фабрик тяжелосредная сепарация применяется в качестве как предварительной первичной операции обогащения исходного алмазосодержащего сырья, так и контрольных и доводочных операций алмазосодержащего материала широкого класса крупности.

Основными факторами, обеспечивающими эффективность процессов тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья рассматриваемого вещественного состава, установлены:

— коррозионная устойчивость гранул ферросилиция в условиях контакта с минерализованными оборотными водными системами процессов ТСС;

— высокое содержание алмазов при максимальном снижении выхода минералов кимберлита в первичные концентраты ТСС перед процессами их окончательной доводки.

Основная проблема для сохранения технологических свойств ферросилиция с целью снижения его потерь в процессах тяжелосредной сепарации алмазосодержащего сырья (устойчивость к коррозионному разрушению и истиранию) — предотвращение окисления ферросилициевых гранул при взаимодействии с коррозионно-активными элементами окружающей водно-воздушной среды.

Окисление и разложение гранулированного ферросилиция приводит к увеличению его безвозвратных потерь в процессе регенерации в 2.5–2.8 раза за счет снижения магнитной восприимчивости частиц в 2–3 раза. Для решения этой проблемы результатами предыдущих исследований установлена необходимость либо модифицировать свойства жидкой фазы ферросилициевой суспензии до значений, обеспечивающих снижение ее коррозионной активности по отношению к ферросилицию, либо создать защитную оболочку на поверхности ферросилициевых гранул, предупреждающую их разрушение при контакте с активной коррозионной водной средой.

Результаты анализа возможности использования наиболее эффективных методов обеспечения коррозионной устойчивости ферросилиция в условиях ТСС алмазосодержащего сырья на обогащательных алмазоизвлекающих фабриках, показали:

- невозможность применения химических реагентов для модифицирования свойств используемых водных систем вследствие сложности их доставки, хранения и последующего дополнительного загрязнения технологической оборотной воды компонентами раствора;

- повышенный расход электроэнергии в случае использования электрохимических методов кондиционирования водных систем ввиду большого объема оборотной воды в технологическом процессе ТСС;

- ограниченность возможности использования химически инертного газа азота вместо воздуха с целью предупреждения окисления гранул ферросилиция при контакте с кислородом.

В качестве наиболее приемлемого для использования в промышленных условиях тяжело-средней сепарации на алмазоизвлекающих фабриках АК “АЛРОСА” апробирован метод модифицирования свойств ферросилиция за счет его азотирования с целью создания на поверхности ферросилициевых гранул защитной оболочки, предупреждающей их разрушение при контакте с коррозионно-активными компонентами водно-воздушной среды.

На первых стадиях исследований создан экспериментальный образец ферросилиция — сплав железа с кремнием при содержании кремния 15%, отличающийся высокими антикоррозионными свойствами и повышенной износостойкостью за счет покрытия его поверхности азотированным слоем.

Результаты выполненных экспериментов с использованием минерализованных оборотных вод процессов ТСС обогатительных фабрик № 3 Мирнинского ГОКа (рис. 7а) и № 12 Удачинского ГОКа (рис. 7б) показали снижение скорости коррозии образцов азотированных сплавов ферросилиция в 5–6 раз по сравнению с исходными образцами [21].

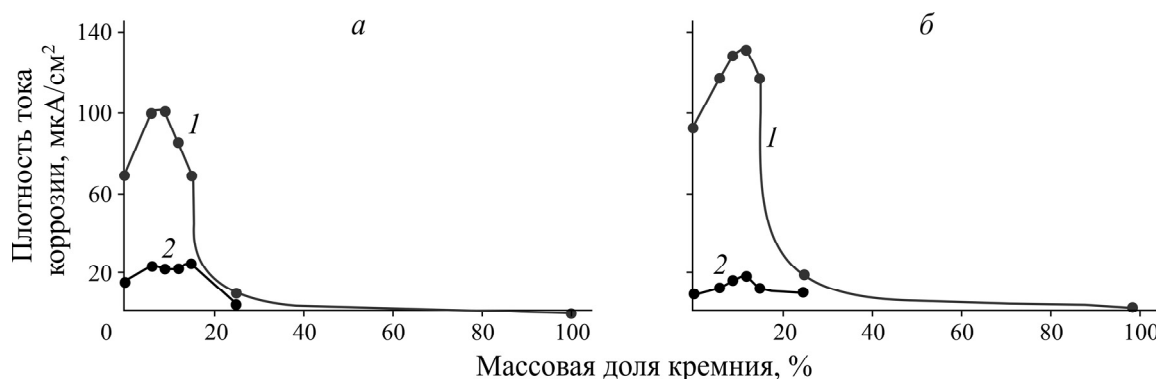


Рис. 7. Снижение скорости коррозии (плотности тока) образцов ферросилиция различных марок (различное содержание кремния) в оборотных водах процессов ТСС ОФ № 3 МГОКа (а) и ОФ № 12 УГОКа (б): 1 — без обработки; 2 — азотированный сплав

На последующих стадиях исследований использован порошковый ферросилиций, применяемый в процессах ТСС обогатительных алмазоизвлекающих фабрик. С целью оценки технологической эффективности азотированного ферросилиция различного компонентного состава в процессах тяжело-средней сепарации на обогатительных фабриках АК “АЛРОСА” проведены комплексные исследования, включающие изучение:

- состава водных систем пяти образцов минерализованных водных систем, отобранных из процессов ТСС на обогатительных фабриках;

- компонентного состава шести образцов исходного и азотированного порошкового ферросилиция, поступающего в разные периоды на обогатительные фабрики, и коррозионной устойчивости ферросилициевых суспензий, приготовленных на их основе с использованием водных систем.

Установлено, что в условиях контакта с наиболее коррозионно-активными минерализованными оборотными водами обогатительных фабрик № 3 и 12 азотированные гранулы ферросилиция теряют свои магнитные свойства медленнее, чем исходные, в среднем на 50.25 и 52.55 % соответственно (рис. 8).

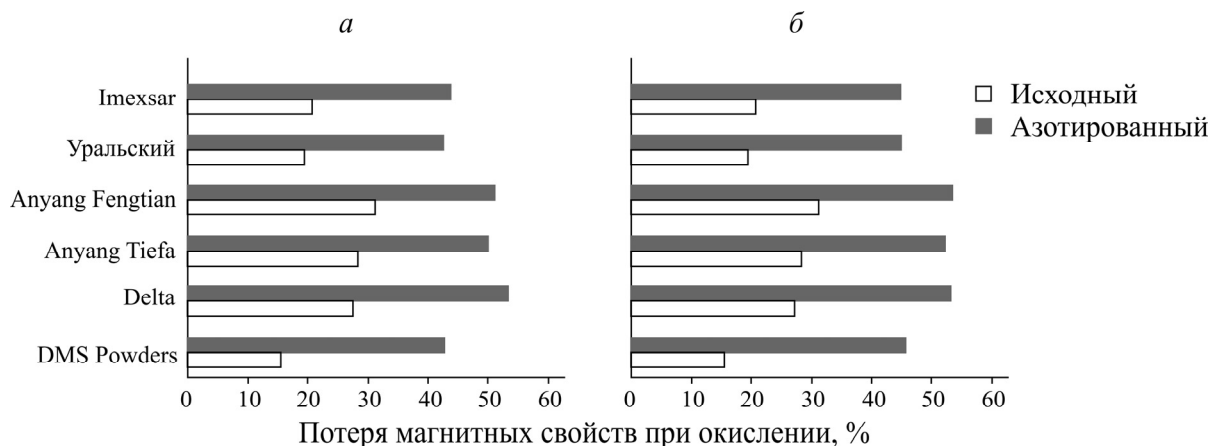


Рис. 8. Диаграммы обобщенных данных изменения магнитных свойств ферросилициевых суспензий в исследуемых условиях: *а* — оборотная вода ОФ № 3; *б* — оборотная вода ОФ № 12

В результате проведенных исследований, разработан и апробирован в промышленных условиях способ подготовки порошкового ферросилиция к тяжелосредной сепарации, заключающийся в использовании метода азотирования ферросилициевых гранул для создания на их поверхности нитридной оболочки, снижающей на 40–50 % скорость окисления и предупреждающей разрушение ферросилиция в условиях тяжелосредной сепарации алмазосодержащего материала. Математическая обработка количественных и качественных показателей опытно-промышленных испытаний процесса позволила установить, что ферросилициевая суспензия на основе исходного (необработанного) ферросилиция теряет свои технологические свойства на 14-е сутки взаимодействия с минерализованной водной системой процесса ТСС, а суспензия на основе азотированного ферросилиция — только на 31-е сутки (рис. 9).

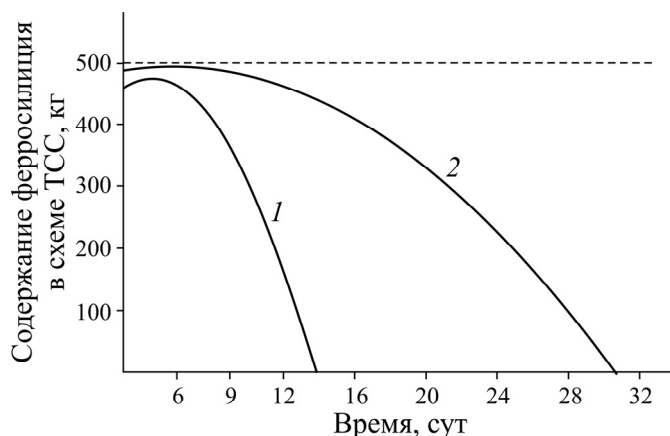


Рис. 9. Прогноз содержания (срока использования) ферросилиция в исследуемых суспензиях схемы ТСС: 1 — исходный; 2 — азотированный

Азотированный ферросилиций имеет технические параметры, позволяющие увеличить срок его полезного использования не менее чем в 2.2 раза. Результаты опытно-промышленных испытаний подтверждены соответствующим актом. Разработка защищена совместным с АК “АЛРОСА” патентом RU 2757298 от 13.10.2021 г. Способ подготовки гранулированного ферросилиция к тяжелосредной сепарации.

Одним из факторов, влияющих на эффективность процессов доводки алмазосодержащих продуктов ТСС кимберлитового материала природного и техногенного происхождения является выход (объем) черновых концентратов. Экспериментальные исследования проведены на пробах безалмазного кимберлитового сырья для условий обогащательных фабрик № 15 и 16 НГОКа АК “АЛРОСА” (эксперименты выполнены с участием аспиранта Ю. Н. Никитиной)

Высокое содержание рудных фракций с различными минеральными, физико-химическими и физико-механическими свойствами в исходном кимберлитовом материале, поступающем в переработку на ОФ № 15, обуславливает нестабильный выход чернового концентрата ТСС, поступающего затем в схему доводки ОФ № 16. Нестабильность приводит к снижению в нем содержания алмазов, перегрузке технологического оборудования и ограничивает общую производительность обогащательного комплекса.

Данные минералогического анализа (табл. 2) в исследуемых пробах кимберлитового материала позволили установить высокое содержание слабомагнитного минерала — сидерита (82.2 %) в присутствии сильномагнитного минерала магнетита и его сростков со слабомагнитными и немагнитными минералами (до 3.3 %).

ТАБЛИЦА 2. Результаты минералогического анализа кимберлитового материала

Минерал	Кварц	Кальцит	Анортит	Доломит	Сидерит	Пирит	Магнетит	Прочие	Итого
Табличная плотность минерала, г/см ³	2.6–2.65	2.71	2.76	2.84	3.96	5.0	5.0–5.2	—	
– 6 + 3 мм	14.52	0.16	7.03	0.38	70.96	1.79	0.030	5.13	100
– 3 + 1 мм	11.99	0.09	0.05	0.09	85.06	0.31	0.003	2.41	100
– 6 + 1 мм	12.50	0.10	1.46	0.15	82.22	0.61	0.010	2.95	100

Для сокращения объема чернового концентрата ТСС в схеме ОФ № 15, перерабатывающей алмазосодержащие пески и россыпи, обоснована и экспериментально апробирована двухстадийная магнитная сепарация, включающая последовательное выделение: магнетита (и его сростков) в слабых (до 2000 Э) магнитных полях; сидерита в сильных (до 14000 Э) магнитных полях. Реализация разработанной схемы обеспечит сокращение выхода концентрата ТСС класса крупности – 6 + 1 мм на 95.8 % (рис. 10).

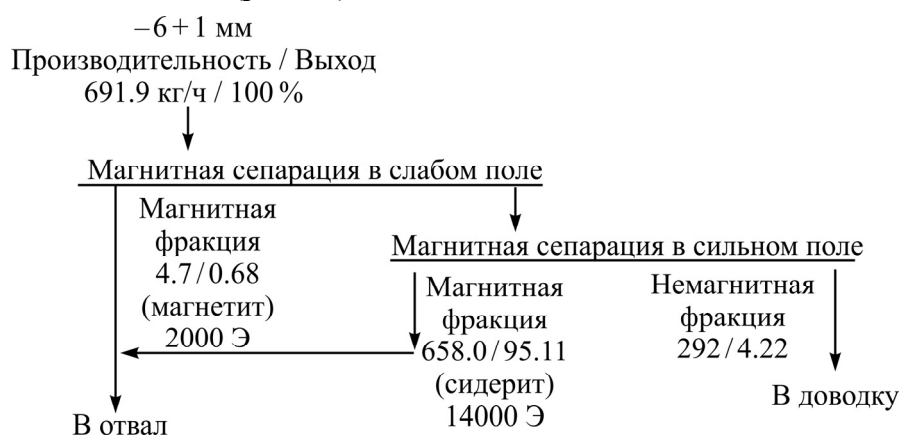


Рис. 10. Схема сокращения выхода концентрата ТСС

Предложенная схема принята к рассмотрению институтом “Якутнипроалмаз” для решения вопроса о возможности промышленной реализации в технологии ОФ № 15 НГОКа АК “АЛРОСА”.

Основная цель представленных разработок предусматривает совместное решение двух задач: обеспечение экономических показателей процессов сепарации алмазосодержащего материала и обеспечение дополнительного извлечения алмазов из хвостов обогащения на основе инновационных методов модифицирования свойств разделяющих сред и минеральных компонентов с дополнительным извлечением алмазных кристаллов по классу крупности + 0.2 мм.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования взаимосвязи поверхностных свойств алмазов с их технологическими свойствами для основных процессов обогащения алмазосодержащих кимберлитов позволили решить поставленную задачу — разработать инновационные процессы интенсификации сепарации труднообогащаемого алмазосодержащего сырья коренных, россыпных и техногенных месторождений, обеспечивающие эффективное природопользование с обеспечением экологической безопасности технологических процессов.

ВЫВОДЫ

Для слабо- и аномально люминесцирующих алмазов подтверждена эффективность использования люминофорсодержащих композиций. Реализация разработанного метода избирательного закрепления люминофоров на поверхности алмазов позволит дополнительно извлекать в действующих схемах рентгенолюминесцентной сепарации кристаллы с аномальными характеристиками природной люминесценции. Систематизированы результаты минералогических и рентгенографических исследований по эффективности применения физико-химических и электрохимических воздействий для деструкции и удаления с поверхности алмазов гидрофилизирующих минеральных образований. Обоснованы высокоэффективные комбинированные методы интенсификации процессов липкостной и пенной сепарации алмазосодержащего сырья рассматриваемых месторождений, позволяющие получить прирост извлечения алмазов.

Разработан способ подготовки порошкового ферросилиция к тяжелосредной сепарации, заключающийся в использовании метода азотирования ферросилициевых гранул, обеспечивающего создание на их поверхности нитридной оболочки. Установлено, что азотированный ферросилиций имеет технические параметры, позволяющие увеличить срок его полезного использования не менее чем в 2.2 раза. Введение дополнительной межцикловой операции магнитной сепарации в схеме ТСС обеспечит сокращение выхода первичного концентрата на 95.8 % в условиях переработки алмазосодержащего сырья с аналогичным составом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Leontiev R. G. and Arkhipova Y. A.** Development of the mining complex of the Russian Far East, IOP Conference Series: Earth and Env. Sci., 2021, Vol. 723, No. 5.
2. **Богданович А. В., Васильев А. М., Урнышева С. А.** Влияние рудоподготовки алмазосодержащих руд на технологию их обогащения // Обогащение руд. — 2017. — № 2. — С. 10–15.
3. **Клюев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А.** Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // Устойчивое развитие горных территорий. — 2020. — № 2 (44) — С. 283–290.
4. **Ivannikov A. L., Kongar-Syuryun C., Rybak J., and Tyulyaeva Y.** The reuse of mining and construction waste for backfill as one of the sustainable activities. IOP Conf. Series: Earth and Env.l Sci., 2019, Vol. 362, No. 1.
5. **Agrosi G., Nestola F., Tempesta G., Bruno M., Scandale E., and Harris J.** X-ray topographic study of a diamond from Udachnaya: Implications for the genetic nature of inclusions, Lithos, 2016, 248–251, 153–159.
6. **Верхотуров М. В., Амелин С. А., Коннова Н. И.** Обогащение алмазов — Красноярск: ИПК СФУ, 2009. — 207 с.

7. Горячев Б. Е. Технология алмазосодержащих руд. Алмазы, кимберлиты, минералы кимберлитов. Минерально-сырьевая база алмазодобывающей промышленности мира. — М.: НИТУ “МИСиС”, 2010. — 326 с.
8. Коннова Н. И., Килин С. В. Теория и практика современной сепарации в тяжелых средах. Моделирование результатов тяжелосредного обогащения. — Красноярск: СФУ, 2013. — 119 с.
9. Napier-Munn T. The dense medium cyclone - past, present and future, Min. Eng., 2018, Vol. 116. — P. 107–113.
10. Джура В. А. Разработка технологии обогащения гравитационных алмазосодержащих концентратов в тяжелых средах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Иркутск: ИрНИТУ, 2004.
11. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Морозов В. В., Ковальчук О. Е., Подкаменный Ю. А., Яковлев В. Н. Исследование механизма и выбор режимов селективного закрепления люминофорсодержащей эмульсии на алмазах // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 104–113.
12. Чантурия В. А., Морозов В. В., Двойченкова Г. П., Тимофеев А. С. Обоснование состава люминофорсодержащей композиции для модифицирования спектрально-кинетических характеристик алмазов в схемах рентгенолюминесцентной сепарации // Обогащение руд. — 2021. — № 4. — С. 27–33.
13. Chanturia V. A., Morozov V. V., Dvoichenkova G. P., Koval'chuk O. E., and Podkamennyi Y. A. Selecting luminophore-bearing modifying agents to adjust spectral characteristics of diamonds, J. Min. Sci., 2021, Vol. 57, No. 4. — P. 625–633.
14. Morozov V. V., Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., and Chanturia E. L. Stimulating Modification of Spectral and Kinetic Characteristics of Diamonds by Hydrophobization of Luminophores, J. Min. Sci., 2021, Vol. 57, No. 5. — P. 821–833.
15. Богущ И. Н., Спеиус З. В., Ковальчук О. Е., Помазанский Б. С. Распределение структурных примесей и флюидных микровключений в кубических и покрытых кристаллах алмаза из трубки Удачная, Якутия, Россия // Геохимия. — 2016. — № 8. — С. 708–717.
16. Spetsius Z. V., Cliff J., Griffin W. L., and O'Reilly S. Y. Carbon isotopes of eclogite-hosted diamonds from the Nyurbinskaya kimberlite pipe, Yakutia: The metasomatic origin of diamonds, Chem. Geol., 2017, 455. — P. 131–147.
17. Коваленко Е. Г., Двойченкова Г. П., Поливанская В. В. Обоснование применения метода термической обработки для повышения эффективности процесса пенной сепарации алмазов // ГИАБ. — 2014. — № 6. — С. 158–164.
18. Коваленко Е. Г. Разработка комбинированного термо-электрохимического метода обработки флотационных систем в процессе пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — М.: ИПКОН РАН, 2015.
19. Подкаменный Ю. А. Повышение извлечения алмазов в условиях липкостной сепарации на основе комбинированного электрохимического и ультразвукового воздействия: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — М.: ИПКОН, 2019.
20. Хмелев В. Н., Леонов Г. В., Барсуков Р. В., Цыганок С. Н., Шалунов А. В. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве. — Барнаул: АлтГТУ, 2007. — 400 с.
21. Петрова Л. Г., Тимофеева Г. Ю., Демин П. Е., Косачев А. В. Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов: учеб. пособие. — М.: МАДИ, 2016. — 148 с.

Поступила в редакцию 25/VIII 2022

После доработки 09/IX 2022

Принята к публикации 21/IX 2022