

**В.А. ЧАНТУРИЯ**, академик РАН,

**Г.П. ДВОЙЧЕНКОВА**, канд. техн. наук

(Россия, Якутск, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова),

**Э.А. ТРОФИМОВА**, канд. техн. наук

(Россия, Москва, Учреждение Российской академии наук Институт проблем комплексного освоения недр РАН)

**А.С. ЧААДАЕВ**, канд. экон. наук,

**И.В. ЗЫРЯНОВ**, д-р техн. наук,

**Г.Х. ОСТРОВСКАЯ**

(Россия, Мирный, Научно-исследовательский и проектный институт "Якутнипроалмаз" АК "АПРОСА")

## **ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОГАЩЕНИЯ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

В настоящее время алмазы добывают в 26 странах мира, причем в тройку лидеров входят Ботсвана, Россия и ЮАР, на долю которых приходится 62% всей мировой добычи алмазов.

Существующие технологии извлечения алмазов из коренных и россыпных месторождений определяются свойствами основного извлекаемого компонента – алмаза и минеральным составом вмещающих пород, а также крайне низким содержанием алмазов в сырье и высокой их ценностью. При среднем содержании алмазов в коренных месторождениях около 1 карат/т ( $2 \times 10^{-5}\%$ ) и практически 100%-ном содержании в конечной продукции степень концентрации должна достигнуть  $2 \times 10^5$ . Таких значений не достигается при обогащении ни одного вида руд цветных и благородных металлов. Даже при обогащении золотосодержащих руд степень концентрации не превышает  $2 \times 10^4$ .

Выбор обогатительных процессов и оборудования обусловлен в первую очередь высокой плотностью алмазов (по сравнению с основной массой вмещающих пород и минералов), их естественной гидрофобностью, способностью люминесцировать при рентгеновском облучении, а также необходимостью в максимальной степени сохранить кристаллы алмазов при дезинтеграции руд.

На действующих и проектируемых алмазоизвлекающих фабриках наибольшее распространение получили методы гравитационного и радиометрического обогащения и, в частности, тяжелосредная сепарация (ТСС) в циклонах, и рентгенолюминесцентная сепарация (РЛС). Отметим, что приоритет в научном обосновании эффективности РЛС при обогащении алмазосодержащих кимберлитов и ее реализации в промышленности принадлежит России.

Современные схемы алмазоизвлекающих фабрик за последние десятилетия стали практически стандартными.

Общепринятая технологическая схема включает следующие элементы: первичное дробление; классификацию по крупности в скрубберах и на грохотах; вторичное дробление (измельчение); тяжелосредную сепарацию; додобра-

## **Загальні питання технології збагачення**

ливание в валковых дробилках высокого давления (роллер-прессах); магнитную сепарацию; рентгенолюминесцентную сепарацию; ручную сортировку; пневматическое транспортирование алмазов. В случае большого содержания алмазов в классе -2 мм применяют флотацию в машинах пенной сепарации. Кроме этого, на обогатительных фабриках применяют липкостную сепарацию для доизвлечения алмазов из хвостов РЛС класса -5 мм.

Как показывает практика последних лет основные проблемы при обогащении алмазосодержащего сырья возникают при переработке материала так называемых мелких классов (-5 мм) с применением процессов липкостной и пенной сепараций.

Для руд ряда месторождений с высоким содержанием мелких алмазов (-5+0,5 мм) применяют обогащение на винтовых сепараторах, липкостную сепарацию и флотацию, проведение которых основано на естественной гидрофобности поверхности кристаллов.

В процессах рудообразования и контакта с минерализованными водами на кристаллах алмаза происходит сорбция химических элементов различного качественно-количественного состава. Это определяет фазовый состав полиминеральных образований на алмазах, гидрофильно-липофильное состояние их поверхности, адсорбционную и адгезионную способность кристаллов, от чего зависит полнота их извлечения физико-химическими методами обогащения.

На формирование первичных полиминеральных нанообразований на поверхности алмазов существенное влияние оказывают вещественный состав и степень изменчивости кимберлитов, а также минерализация и ионный состав находящихся в них подземных вод.

Алмазы из кимберлитов верхних горизонтов (с высокой степенью изменчивости и содержанием вторичных минералов 80...90%) извлекаются в процессе пенной сепарации лишь на 20% и менее. Извлечение алмазов их кимберлитов нижних горизонтов (с низкой степенью изменчивости и содержанием вторичных минералов до 50%) достигает 80% и более.

В табл. 1 приведены обобщенные данные РФС по интегральной характеристике первичных нанообразований на алмазах с гидрофобной и гидрофильной поверхностью кристаллов.

Из сравнения представленных в табл. 1 выделенных типов алмазов видно, что помимо указанных различий в структуре и составе поверхности, на гидрофобных кристаллах площадь и глубина проникновения бронирующей пленки в 2 раза меньше, чем на гидрофильных.

Методом ОЖЕ – спектроскопии установлены основные различия элементного и фазового составов нанообразований (на глубине от 3 до 180 нм) на природных алмазах с различным гидрофильно-липофильным состоянием поверхности (рис. 1).

## Загальні питання технології збагачення

Таблиця 1

Характеристика поверхностной пленки на алмазах различного типа

№	Элементы, % атомн. (~30Å)					C/O	Поверхностная пленка		Гидрофобность, %
	Si	Fe	Mg	C <sub>алм</sub> C = C	O		Площадь распространения, %	Глубина проникновения, Å	
1	Гидрофобные								
	1,2-1,6	0,6-0,8	1,2-1,4	73,2-84,6	12,2-17,9	4,9-6,9	20-25	800	100
2	Техногенно-гидрофильные								
	1,2-2,7	0,4-1,4	0,3-3,2	70,9-84,6	11-23,9	3,0-5,6	49-51	1400	53,4
3	Природно-гидрофильные								
	1,1-6,4	2,7-5,8	0,9-8,1	44,5-82,5	12,9-36,2	1,3-2,6	70-75	1800	0

Анализ полученных данных показал, что различие в поверхностных свойствах алмазов с гидрофобной и гидрофильной поверхностью связано со структурой высокоэнергетической части спектра 1s электронов углерода. Вблизи основной связи (C=C), равной 285 эВ, соответствующей чистому алмазу, фиксируется два других сигнала, характеризующие сорбирование алмазом кислородно-углеродных группировок. В результате идентификации данных установлено, что гидрофобные алмазы покрыты слоем CO<sub>2</sub> газа и H-CO<sub>3</sub> радикалами, а гидрофильные – достаточно устойчивым слоем карбонатов. В сравнении с гидрофобными алмазами природно-гидрофильные кристаллы содержат на поверхности значительное количество до 10% полиминеральных примесей (Mg, Si, Fe) в виде карбонатов, магниевых силикатов типа талька и гидратированной формы окиси Fe с площадью простираения примесной пленки >70.

Кроме того установлено, что при увеличении продолжительности контакта с 2 до 24 часов алмазов с минерализованной водной системой на поверхности (~3 нм) кристаллов формируется гидрофильная магниезиальная-силикатная пленка с повышенным в 2-4 раза содержанием в ней элементов Si, Mg, Fe и C при последовательной трансформации их соотношения и преобразования серпентина в тальк-хлорит, что приводит к снижению гидрофобности поверхности алмазов в 2,5 и 4 раза.

## Загальні питання технології збагачення

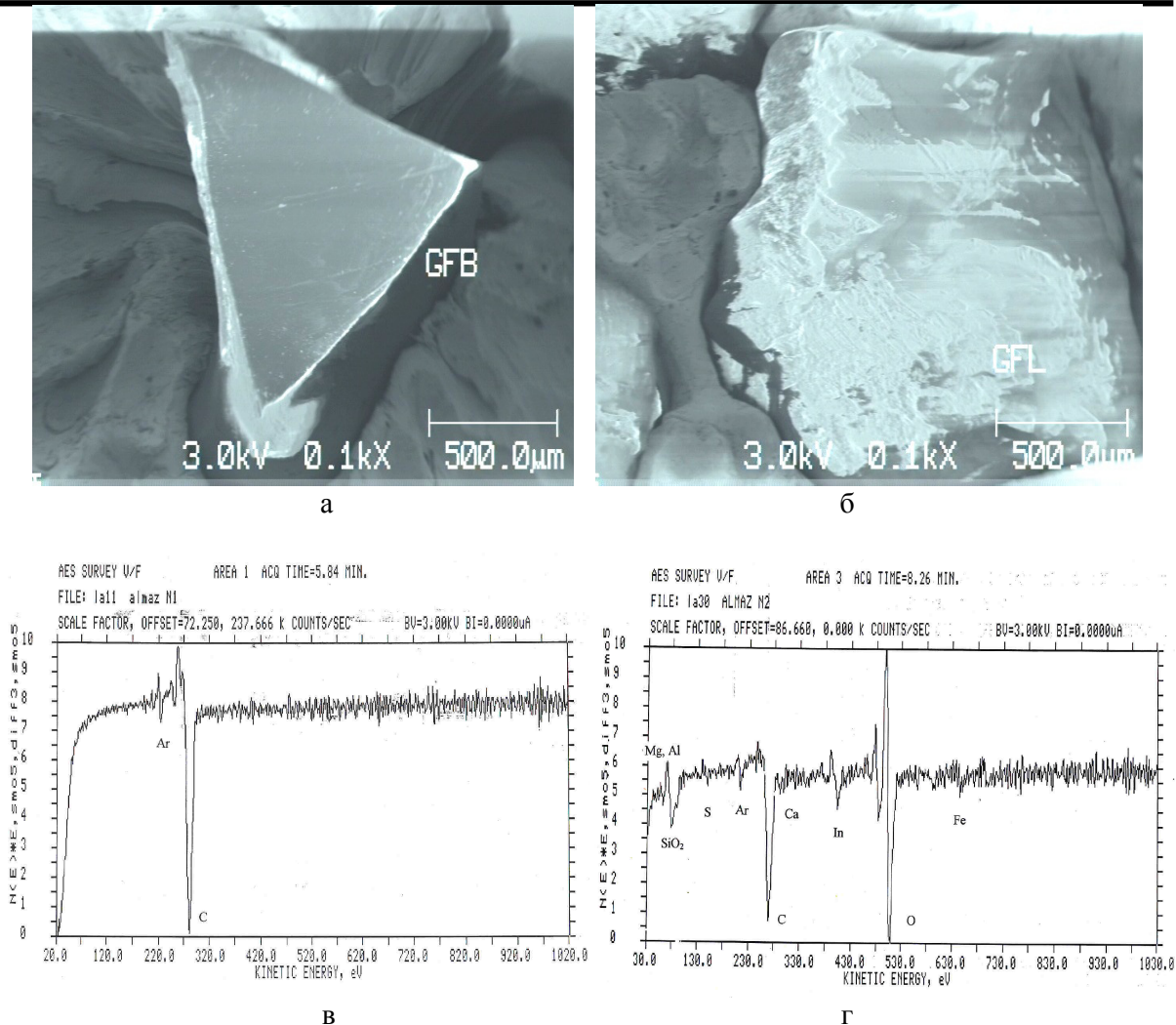


Рис. 1. Исследование алмазов методом ОЖЕ-спектроскопии:  
а, в – гидрофобный алмаз; б, г – гидрофильный алмаз

Наличие на поверхности алмаза полиминеральных пленок и гидроокисных соединений, определяющих гидрофильность кристаллов, требует поиска решений по их модификации, деструкции и растворения с целью повышения его гидрофобности, очистки, а также улучшения качества кристаллов.

Научно обоснован и реализован электрохимический метод водоподготовки, обеспечивающий создание оптимального ионного состава жидкой фазы пульпы и высокой концентрации тонкодисперсных пузырьков (50-100 мкм) электролизных газов, что обеспечивает максимальное извлечение алмазов в условиях замкнутого водооборота [1-3].

## Загальні питання технології збагачення

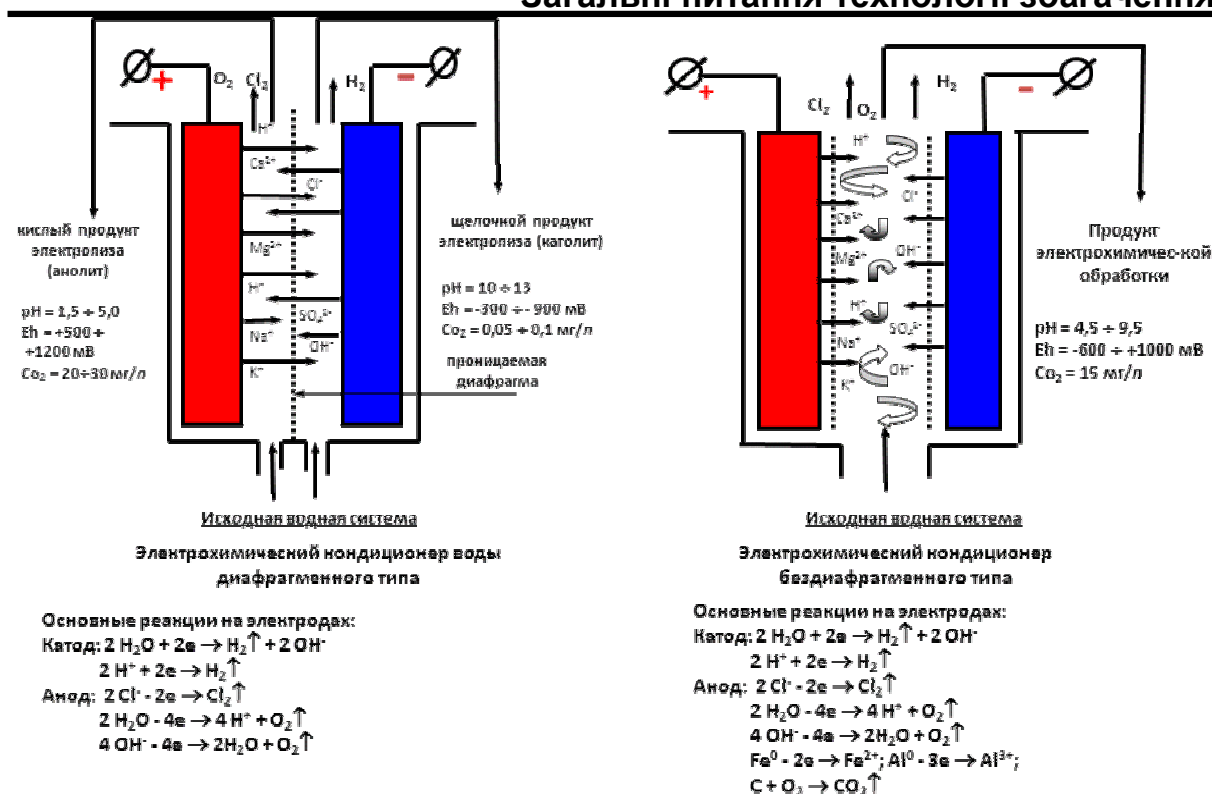


Рис. 2. Электрохимическая технология водоподготовки, обеспечивающая получение оптимального ионного состава жидкой фазы пульпы и высокую концентрацию тонкодисперсных пузырьков (50-100 микрон) электролизных газов

В процессе электрохимической обработки воды (рис. 2 за счет протекания реакций электролиза образуются два продукта: католит с сильно восстановительными свойствами и повышенной щелочностью и анолит с высокими окислительными свойствами и кислотностью. Продукты электролиза воды характеризуются высокой насыщенностью тонкодисперсных газов – водорода (католит) и кислорода (анолит). Кроме того, регулируя плотность тока и количество электричества на единицу объема воды можно направленно изменять ионный состав жидкой фазы вследствие концентрации катионов у катода и анионов у анода (рис. 2). В случае бездиафрагменной обработки воды пределы изменения значений pH и Eh зависят от ионного состава обрабатываемой воды, но жидкая фаза максимально насыщается тонкодисперсными (10-100 мкм) газами электролиза.

Таким образом, электрохимическая обработка воды позволяет без использования химических реагентов получать воду с заранее заданными физико-химическими свойствами и ионным составом, оптимальным для любого технологического процесса.

Выявлено, что продукты электрохимической обработки воды деструктурируют полиминеральные нанообразования на алмазах, способствуя очищению и гидрофобизации их поверхности (табл. 2).

## Загальні питання технології збагачення

Таблиця 2

Элементный состав поверхностной пленки на алмазах  
после обработки продуктами электролиза воды

№	Элементный состав, % ат.					C/O	Площадь пленки S, %	Гидрофобность, %
	Si	Fe	Mg	C=C	O			
Природно-гидрофильные								
1	3,8	4,25	4,5	63,5	24,5	2,6	73	0
После обработки катодом с pH – 10,6								
1a	1,6	2,2	3,3	65,7	27,2	2,4	52	23,3
После обработки анодом с pH ~ 3								
1б	2,9	1,6	2,9	80,7	12,9	6,2	42	33,3
Гидрофобные								
2	1,4	0,7	1,3	78,9	15,0	5,9	23	100
Техногенно-гидрофильные								
3	1,95	0,9	1,65	77,7	17,5	5,3	50	53,4
После обработки катодом с pH – 10,6								
3a	1,1	2,0	3,9	72,1	22,2	3,2	54	16,1
После обработки анодом с pH ~ 3								
3б	1,3	0,2	0,4	86,4	8,3	10,4	26	65,7

Оптимальным очищающим действием характеризуется продукт с pH ~ 3, обработка алмазов которым приводит к деструкции (разрыхлению и разрушению) примесной пленки, сформированной при воздействии минерализованной водной системы, с изменением элементного и фазового составов поверхности кристаллов. На их поверхности наблюдается полное отсутствие железа, явное смещение Si/Mg отношения в магниальную сторону, что дает основание предполагать преимущественно серпентинитовую природу силикатной части поверхностной пленки. Гидрофобность поверхности алмаза с нулевой возрастает до 60%.

Результаты промышленной апробации электрохимических воздействий на водные системы, рудную пульпу и минеральные компоненты, представленные на диаграммах рис. 3, подтвердили ранее установленную [3, 4] технологическую эффективность применения в циклах липкостной и пенной сепарациях за счет комплексных эффектов активации поверхности гидрофильных кристаллов, снижения расхода реагентов и интенсификации процесса обесшламливания используемых оборотных водных систем.

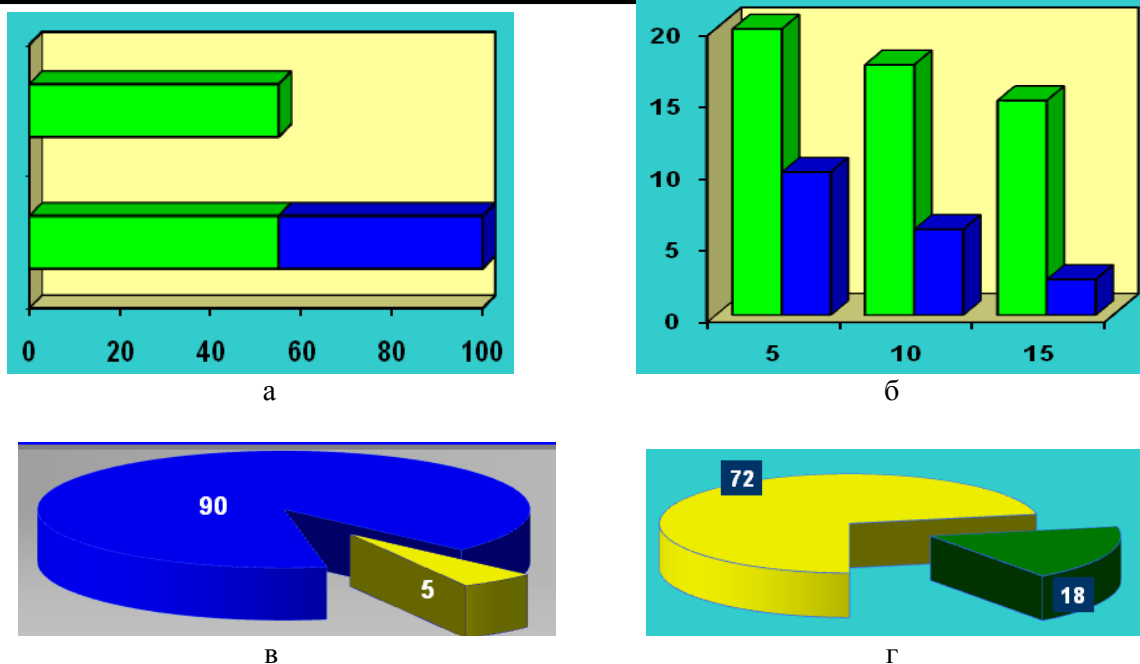


Рис. 3. Снижение расхода реагентов (а), интенсификация процесса обесшламливания (б), увеличение выхода алмазов (в, г) в результате применения электрохимической обработки воды

В связи с ухудшением качества перерабатываемого сырья и, соответственно, качества черновых концентратов, возникает необходимость интенсификации процессов доводки алмазосодержащих продуктов, полученных в основных обогатительных процессах.

Согласно действующей технологии обогащения алмазосодержащих руд схема доводки алмазосодержащих концентратов крупностью  $-5+0$  мм предусматривает использование рентгенолюминесцентной, электрической и магнитной сепараций, необходимость применения которых обусловлена недостаточной избирательностью и эффективностью основных процессов обогащения для алмазного сырья данной крупности. В качестве основного метода доводки принята рентгенолюминесцентная сепарация, которая является достаточно сложным процессом, имеющим свои особенности для извлечения алмазов с пониженной интенсивностью люминесценции.

Концентрат липкостной сепарации с остатками жировой мази на кристаллах алмазов и частицах кимберлита обезжиривается перед технологическими операциями доводки промывкой горячей водой ( $\sim 90^{\circ}\text{C}$ ) или растворами кальцинированной соды и поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Экспериментально доказано, что при этом в водном растворе происходит частичное омыление органических составляющих жировой мази, которые при удалении жидкой фазы оседают на поверхности алмазов в виде пленок, твердеющих при высокотемпературной сушке и изменяющих природные поверхностные и объемные свойства кристаллов. Вследствие этого происходит изменение интенсивности их естественной люминесценции, что, в свою очередь, при-

## **Загальні питання технології збагачення**

водить к снижению эффективности процесса сепарации и увеличению потерь алмазов с хвостовыми продуктами.

Институтами ИПКОН РАН и "Якутнипроалмаз" разработан метод разложения, растворения и последующего удаления с поверхности алмазных кристаллов примесей органического происхождения, основанный на применении эмульсии солярового масла и водного раствора ПАВ, проведена промышленная апробация разработанной технологии.

В результате выполненного цикла испытаний установлена технологическая эффективность эмульсионного метода отмывки концентратов липкостной сепарации от жировой мази перед процессом их высокотемпературной сушки. С использованием фотографии и методов рентгенофотоэлектронной спектроскопии, инфракрасной спектроскопии, ультрафиолетовой спектроскопии установлено, что поверхность кимберлитовых алмазосодержащих концентратов, обработанных перед высокотемпературной сушкой эмульсией, и извлеченных из них кристаллов практически полностью очищены от жировой мази (рис. 4а, 5а). Поверхность кимберлитовых алмазосодержащих концентратов липкостной сепарации, прошедших перед сушкой стандартную технологию отмывки в горячей воде, а так же извлеченных из них кристаллов, практически полностью покрыта пленкой черного цвета, образовавшейся при выгорании жировой мази (рис. 4б, 5б). Результатами промышленных испытаний установлено, что при использовании водоэмульсионной технологии отмывки алмазосодержащих концентратов липкостной сепарации от жировой мази выход алмазов (касса) крупностью  $-5+2$  мм увеличивается в среднем в 3,3 раза практически по всем контролируемым классам (рис. 6).

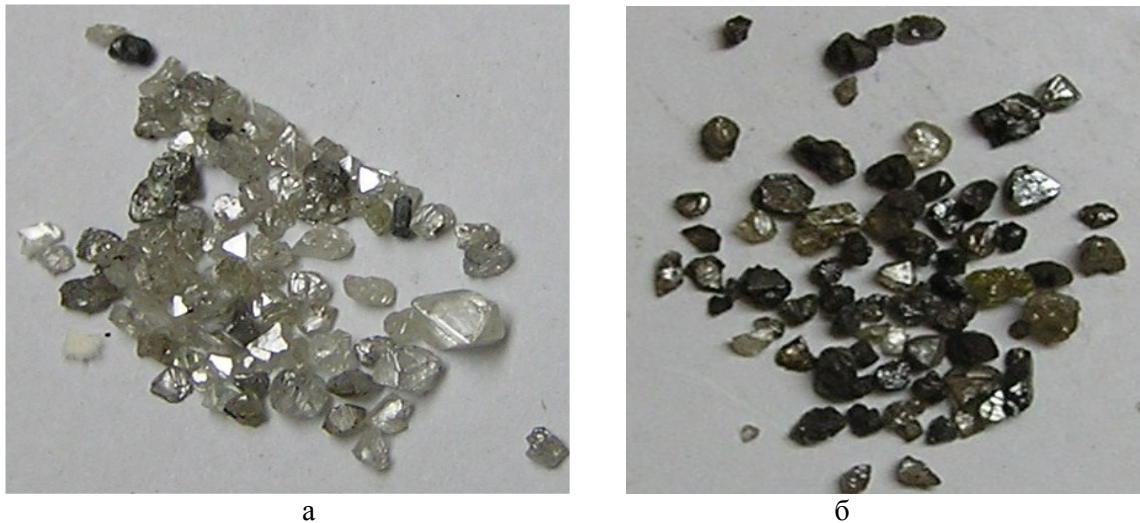


Рис. 4. Кристаллы алмазов, извлеченные из концентратов липкостной сепарации после их высокотемпературной сушки с предварительной обработкой эмульсией (а) и предварительной отмывкой по стандартной технологии (б)



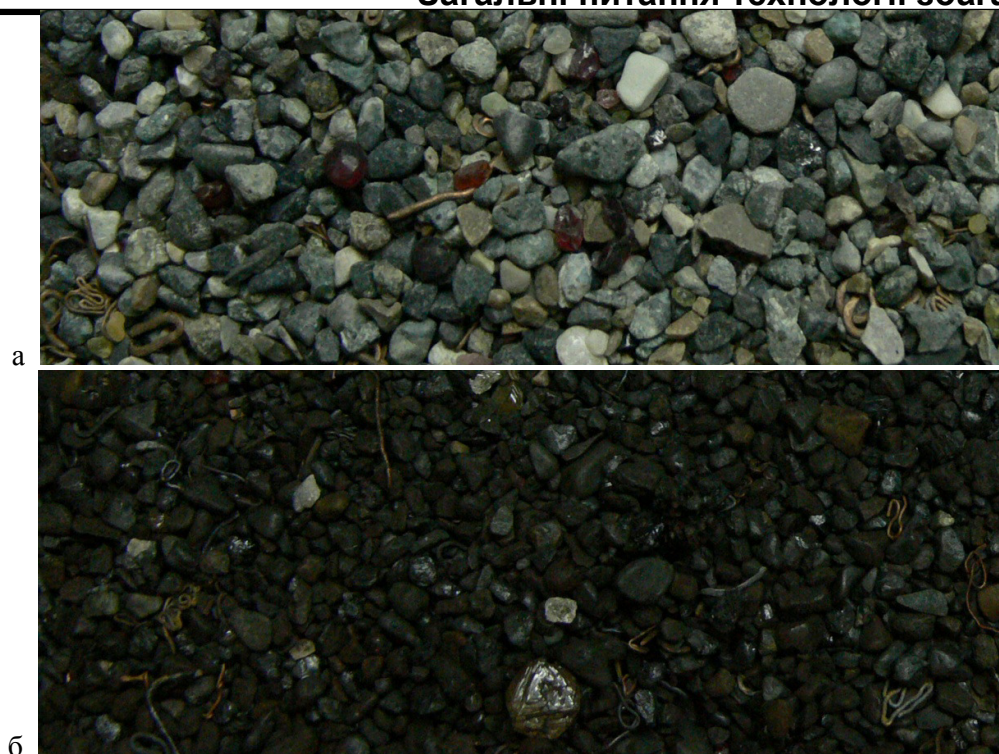


Рис. 5. Алмазосодержащие концентраты после их высокотемпературной сушки, полученные:  
 – липкостной сепарацией – с отмывкой эмульсией (а);  
 – липкостной сепарацией – с отмывкой по стандартной технологии (б)

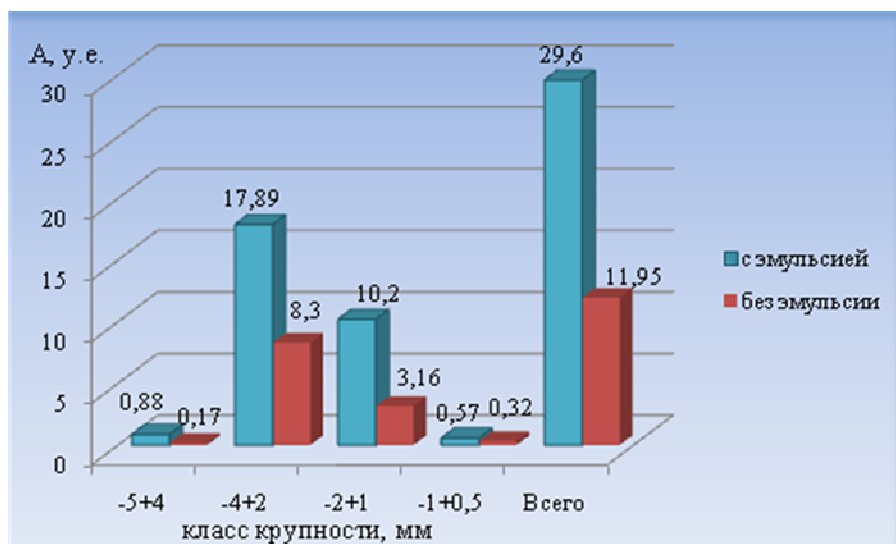


Рис. 6. Выход (касса) алмазов в концентрат липкостной сепарации с применением в цикле доводки эмульсионного и стандартного метода отмывки алмазосодержащих продуктов перед процессом их высокотемпературной сушки

Одним из актуальных направлений интенсификации процесса пенной сепарации является оптимизация реагентного режима.

Реагентный режим, применяемый при пенной сепарации алмазосодержа-

## **Загальні питання технології збагачення**

щих руд крупністю -2,0+0,5 мм, предусматривает, как правило, использование в качестве собирателей смесь мазута флотского (Ф-5), аэрофлота (ИМА-1012) и вспенивателя (ОПСБ). Как известно, реагент Ф-5 является продуктом переработки нефти и состоит из ряда фракций, отличающихся молекулярной массой и свойствами. Разнообразие количества и свойств отдельных фракций реагента Ф-5 предъявляет особо жесткие требования к постоянству его состава при использовании в качестве собирателя. Отсутствие в последние годы стабильного состава флотского мазута привело к значительному снижению его эффективности как собирателя. Исследованиями, выполненными в институте "Якутнипроалмаз", установлена возможность совершенствования реагентного режима пенной сепарации путем замены мазута Ф-5 на более эффективный и дешевый собиратель, отвечающий условиям флотации при низких температурах пульпы. С этой целью предложено использовать водонефтяную эмульсию (ВНЭ), полученную из нефтяных шламов попутной добычи алмазосодержащих кимберлитов. Нефтяные шламы представляют собой смесь воды, нефти и кимберлитовых механических примесей, образующейся в результате вскрытия рудного кимберлитового тела. С целью получения из них водонефтяной эмульсии, используемой в качестве реагента-собирателя для процесса пенной сепарации алмазосодержащего сырья, предложен метод виброструйной магнитной активации, позволяющий выделить из нефтяных шламов избыток воды и механические примеси, а также максимально повысить однородность их состава.

Исследования влияния длительности виброструйной магнитной активации нефтешламов на дисперсность частиц фазовых составляющих полученных водонефтяных эмульсий, производилась с использованием ИК спектроскопии и метода фотографирования под микроскопом.

Как видно из характера спектра, приведенного на рис. 7, органическая часть исходных нефтесодержащих шламов представлена сложной смесью нефтяных компонентов. В ИК-спектре присутствуют полосы поглощения, характерные для метиленовых групп  $3000-2800$ ,  $1460$ ,  $1380$ ,  $725$   $\text{см}^{-1}$ , а также полоса валентных колебаний  $\text{C}=\text{C}$  связей аренового кольца при  $1609-1603$   $\text{см}^{-1}$ . Установлено, что органическая часть представлена сложной смесью окисленных нефтепродуктов, в состав которых входят углеводороды, азотистые и ароматические соединения. В спектре также присутствуют сильные полосы поглощения в области  $3600-3400$  и  $1640-1615$   $\text{см}^{-1}$ , характерные для колебательных и деформационных колебаний гидроксильной группы (вода).

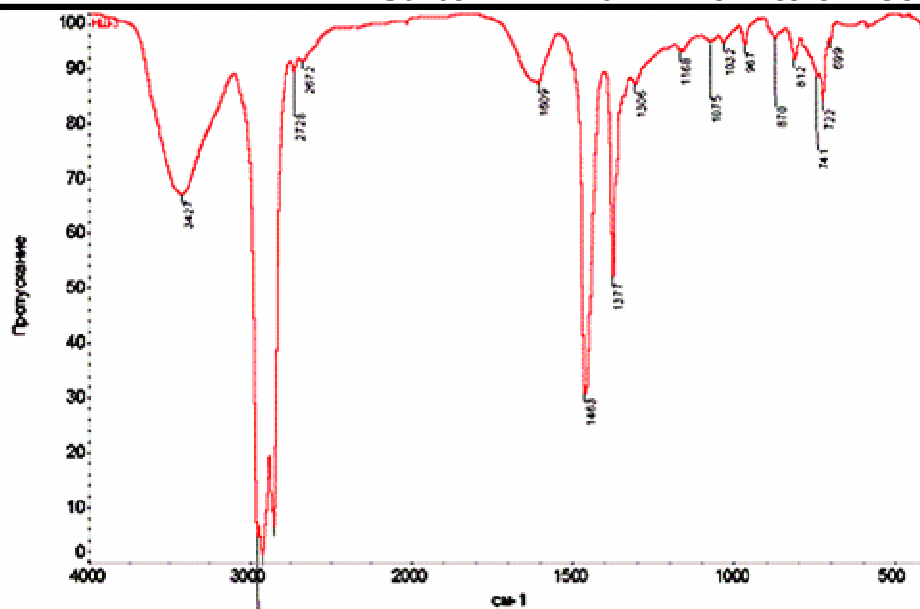


Рис. 7. ИК-спектр исходного образца нефтешламов

Как видно из представленных фотографий (рис. 8), выполненных с использованием микроскопа, в исходном продукте присутствуют крупные водяные линзы и водяные гнёзда (рис. 8 А). В результате виброструйной магнитной активации (ВСМА) размеры микрочастиц водной фазы уменьшаются в десятки раз (рис.8, Б), что значительно повышает однородность состава конечного продукта – водонефтяной эмульсии.

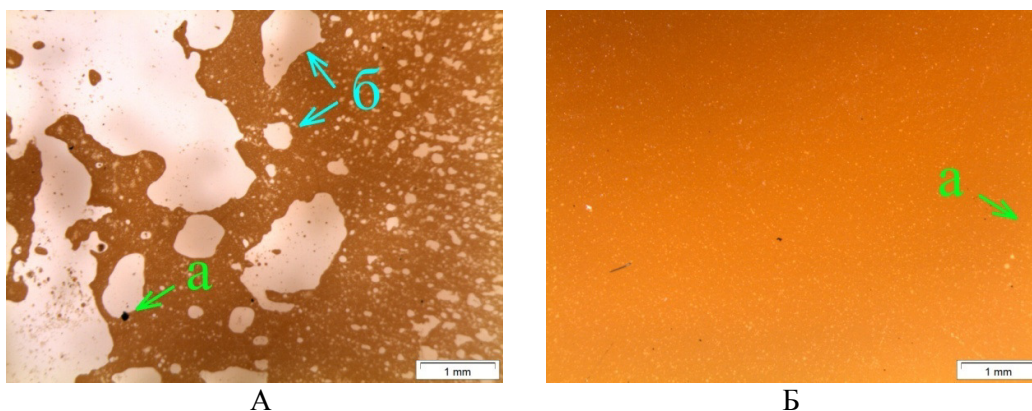


Рис. 8. Изменение однородности состава нефтяных шламов в процессе их обработки методом ВСМА:  
 А – Исходные нефтяные шламы Б – Водонефтяная эмульсия.  
 а – механические примеси (шламы); б – водная фаза

Промышленными испытаниями, проведенными в переделе пенной сепарации, установлено, что использование ВНЭ в качестве реагента-собирателя позволяет получить прирост извлечения алмазов в концентрат от 1,7 до 23% в зависимости от типа перерабатываемого сырья. При этом расход реагента-

## **Загальні питання технології збагачення**

собирателя сокращается на 15%, вспенивателя (ОПСБ) – на 20%. В процессе испытаний проведена апробация применения электрохимически обработанной воды для предварительной гидрофобизации алмазных кристаллов перед взаимодействием с реагентом-собирателем ВНЭ. Результатами испытаний установлено, что кондиционирование рудной массы с электрохимически обработанной водой перед взаимодействием с реагентом ВНЭ дополнительно увеличивает извлечение алмазов в концентрат пенной сепарации в среднем на 2%.

Таким образом, современные направления интенсификации процессов обогащения и доводки алмазосодержащего сырья крупностью -5 мм, позволят получить следующие эффекты при их промышленной реализации:

1. Повышение извлечения алмазов в процессах липкостной и пенной сепараций на 5...18% в зависимости от типа перерабатываемого сырья;
2. Повышение извлечения (касса) алмазов в процессах доводки алмазосодержащих концентратов липкостной сепарации в 3,3 раза;
3. Снижение содержания шламов в оборотных водах технологических процессов в 2,5 раза;
4. Снижение расхода реагентов в процессе пенной сепарации на 15%.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках комплексного проекта № 2010-218-01-001 по созданию высокотехнологичного производства, выполненного с участием российского высшего учебного заведения.*

### **Список литературы**

1. Chanturiya V.A., Trofimova E.A., Dvoichenkova G.P., Vedin A.T., Zuev A.V., Bichkova G.M. Electrochemical water treatment technology in diamond-kimberlite processing: XXIII International Mineral Processing Congress, 2006, 3-8 September. – Istanbul, Turkey, 2006. – V 2. – P. 1541-1545.

2. Chanturiya V.A., Trofimova E.A., Dvoichenkova G.P., Bogachev V.I., Zaskovich M.V. Electrochemical pretreatment of recycled water in flotation of non-sulphide and diamond-containing ores: Proceeding of the XIX International Mineral Processing Congress. – Colorado, USA, 1995. – Vol. 4. – P. 101-104.

3 Теория и практика использования электрохимического метода водоподготовки для интенсификации процессов обогащения алмазосодержащих кимберлитов / В.А/ Чантурия, Э.А. Трофимова, Г.П. Двойченкова и др. // Горный журнал. – 2005. – №4. – С. 51-55.

4. Интенсификация очистных операций доводки алмазных концентратов применением электрохимически обработанных водных систем / А.В. Зуев, Э.А. Трофимова, Г.П. Двойченкова и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 7. – С. 183-184.

© Чантурия В.А., Двойченкова Г.П., Трофимова Э.А., Чаадаев А.С.,  
Зырянов И.В., Островская Г.Х., 2012

*Надійшла до редколегії 24.02.2012 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*