

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕННОЙ СЕПАРАЦИИ АЛМАЗОВ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА СОБИРАТЕЛЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА

В.В. Морозов<sup>1</sup>, И.В. Пестряк<sup>1</sup>, Е.Г. Коваленко<sup>2</sup>, С.П. Лезова<sup>1</sup>, В.В. Поливанская<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: dchmggu@mail.ru

<sup>2</sup> Институт «Якутнипроалмаз», Республика Саха (Якутия),  
Мирный, Россия

**Аннотация:** Перспективным путем повышения извлечения технических алмазов из кимберлитовых месторождений является совершенствование реагентного режима пенной сепарации и, в частности, выбор состава собирателей и определение условий их применения. С использованием экстракционно-спектральной методики определены количественные и качественные закономерности распределения низко- и высокомолекулярных фракций собирателя между твердой и жидкой фазами в процессе пенной сепарации. Установлена важная роль фракции смол и асфальтенов, необратимо закрепляющихся на поверхности алмазов и обеспечивающих удержание капель низко- и среднемолекулярных углеводородов. Обоснована возможность получения собирателя с оптимальным соотношением фракций легких дистиллятов, нефтяных масел, смолы и асфальтенов смешиванием мазута М-40 и дизельного топлива в заданных соотношениях. Показано, что при использовании компаундных собирателей с массовой долей мазута М-40 в 60–70% достигается повышение извлечения алмазов на 2,7–3,5%. Предложен состав собирателя на основе мазута М-40, дизельной фракции и органических диспергирующих присадок группы кетонов, обеспечивающий интенсификацию диспергирования реагента-собирателя в водной фазе и повышение флотиремости алмазов. Разработанные компаундные собиратели КСМ-1 и КСМ-2 прошли апробацию на установке пенной сепарации и показали возможность увеличения извлечения алмазов в концентрат на 5–7,5%. Выбран интервал температур 14–24 °С для операций кондиционирования исходного рудного питания с флотационными реагентами и непосредственно процесса пенной сепарации, обеспечивающий максимальное извлечение алмазов в концентрат при высокой селективности процесса при использовании компаундных собирателей на основе мазута.

**Ключевые слова:** алмазы, пенная сепарация, экстракция, УФ-спектроскопия, ИК-спектроскопия, компаундные собиратели, мазут, дизельное топливо.

**Для цитирования:** Морозов В. В., Пестряк И. В., Коваленко Е. Г., Лезова С. П., Поливанская В. В. Повышение эффективности пенной сепарации алмазов на основе оптимизации состава собирателя и температурного режима // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 8. – С. 135–147. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_8\_0\_135.

---

## Stimulation of frother separation of diamonds by optimizing collecting agent composition and temperature conditions

V.V. Morozov<sup>1</sup>, I.V. Pestryak<sup>1</sup>, E.G. Kovalenko<sup>2</sup>, S.P. Lezova<sup>1</sup>, V.V. Polivanskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,  
e-mail: dchmggu@mail.ru

<sup>2</sup> «Yakutniproalmaz» Institute, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

---

**Abstract:** A promising way of enhancing recovery of commercial diamonds from kimberlite ore is improvement of the reagent regime of frother separation and, in particular, selection of composition of collecting agents and their application conditions. Using spectral extraction, the quantitative and qualitative distributions of low- and high-molecular fractions of collector in solid and liquid phases of frother separation are determined. The important role of resin and asphaltene fractions is emphasized: they irreversibly attach to diamond surface and ensure retention of drops of low- and medium-molecular hydrocarbons. Producibility of a collecting agent with the optimal ratio of fractions of light distillates, hydrocarbon oils, resin and asphaltenes by mixing fuel oil M-40 and diesel fuel at assigned proportions is substantiated. It is shown that the use of compound collectors at the mass fraction of fuel oil M-40 of 60–70% allows increasing recovery of diamonds by 2.7–3.5%. The proposed composition of a collector made of fuel oil M-40, diesel fraction and organic dispersant additives from cetone group stimulates dispersion of the collecting agent in water phase and enhances floatability of diamonds. The frother separation tests of developed compound collectors KSM-1 and KSM-2 have proved feasibility of the increased extraction of diamonds to concentrate by 5–7.5%. The selected temperature range of 14–24 °C for conditioning of initial ore feed with flotation agents and for the frother separation ensures the maximum recovery of diamonds in concentrate at high selectivity using the compound collectors based on fuel oil.

**Key words:** diamonds, frother separation, extraction, UV spectroscopy, IR spectroscopy, compound collectors, fuel oil, diesel fuel.

**For citation:** Morozov V. V., Pestryak I. V., Kovalenko E. G., Lezova S. P., Polivanskaya V. V. Stimulation of frother separation of diamonds by optimizing collecting agent composition and temperature conditions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(8):135-147. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_8\_0\_135.

---

### Введение

Пенная сепарация является наиболее эффективным процессом для извлечения из кимберлитов технических алмазов классов крупности менее 2 мм [1, 2]. При пенной сепарации алмазов в качестве собирателей используются нефть и различные нефтепродукты, включая мазут флотский Ф5, водонефтяные эмульсии и компаундные собиратели на их основе [3]. Колебания состава применяемых в качестве компаундного собирате-

ля нефтепродуктов, изменение температуры флотационной пульпы приводит к снижению показателей пенной сепарации [4].

Причинами такого ухудшения является недостаточно устойчивое закрепление аполярного собирателя на поверхности алмазов. Закрепление собирателя обеспечивается удалением с поверхности алмазов гидрофилизирующих покрытий, выбором оптимального состава собирателей и температурного режима

операций кондиционирования и пенной сепарации [5, 6].

Задачей исследования является выбор состава многокомпонентных собирателей и режимов, обеспечивающего повышение эффективности пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов. В качестве подхода к решению данной задачи перспективно рассмотрение собирателей как компаундов с вариациями массовых долей трех базовых фракций и установление наилучших соотношений между ними [4]. Для эффективного закрепления собирателя на поверхности алмазов предложено использование специальных добавок реагентов — диспергаторов и поддержание оптимального температурного режима процесса кондиционирования питания пенной сепарации с флотационными реагентами [7]. Для установления закономерностей взаимодействия компаундных собирателей с алмазами и анализа связи показателей пенной сепарации с фракционным составом собирателя целесообразно использовать спектральные методы исследования распределения собирателя по фазам пульпы флотационного процесса [8].

### **Методика эксперимента**

Для проверки собирательных свойств исследуемых нефтепродуктов и их смесей использовалась установка беспенной флотации — трубка Халлимонта [2]. Полупромышленные тесты проводились на установке пенной сепарации института «Якутнипроалмаз». Конкретные условия экспериментов приведены в соответствующих разделах статьи.

Для измерения распределения собирателя между продуктами и фазами флотационного опыта использовали экстракционно-спектрофотометрический метод [9, 10]. Методика включала экстракцию реагента с поверхности твердой фазы и из водной фазы флотационной

пульпы органическими растворителями и определение количества экстрагированных веществ с применением УФ-спектрофотометрии [11].

Определение фракционного состава, закрепившегося на алмазах и перешедшего в водную фазу компаундного собирателя, проводили методом ИК-спектрофотометрии, как непосредственно кристаллов алмазов, так и полученных экстрактов. В обоих случаях использовали метод ИК-Фурье-спектроскопии с применением матрицы на основе бромида калия [12] и с вычитанием из получаемых спектров фонового спектра алмаза.

Исследование структуры нефтепродуктов осуществляли методом комбинационной спектроскопии в УФ-видимом диапазоне света [13]. Снимки тонкого слоя нефтепродуктов получали на микроскопе Микромед-3-ЛЮМ.

### **Результаты физико-химических исследований и их обсуждение**

Для установления количества закрепившегося компаундного собирателя снимали УФ-спектры экстракционной вытяжки с поверхности алмазов и водной фазы и ИК-спектры кристаллов алмазов. В соответствии с экстракционно-спектральной методикой после проведения флотационного опыта концентрат алмазов подсушивали и обрабатывали в течение 4 мин в закрытой колбе экстрагентом — четыреххлористым углеродом ( $CCl_4$ ). Полученный экстракт переносили в кювету спектрофотометра ПЭ-5400 УФ и измеряли поглощение излучения при длине волны  $\lambda = 315$  нм. При данной длине волны величина сигнала прямо пропорциональна концентрации адгезионно-активных фракций нефтепродукта (рис. 1, а). [9, 14]. Методика включала определение количества реагента, извлеченного из объекта исследований по результату фотоколоримет-

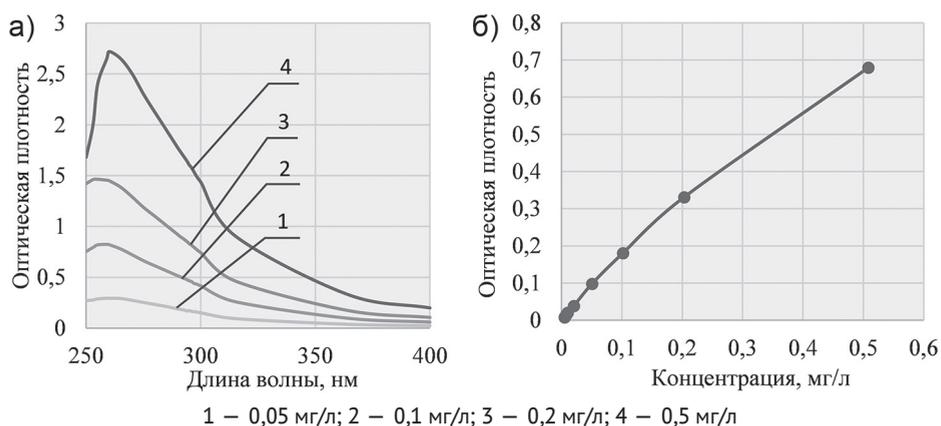


Рис. 1. УФ-спектры растворов мазута разной концентрации в  $CCl_4$  (а) и зависимость оптической плотности от концентрации при 315 нм (б)

Fig. 1. UV spectra of different concentration fuel oil solutions in  $CCl_4$  (a) and optical density versus concentration at 315 nm (b): 1 – 0.05 mg/l; 2 – 0.1 mg/l; 3 – 0.2 mg/l; 4 – 0.5 mg/l

рирования полученного экстракта по калибровочной зависимости, получаемой для каждого состава компаундного собирателя (рис. 1, б).

Результаты спектральных исследований показали, что при использовании в качестве собирателя низкокипящих нефтепродуктов (керосина, дизельного топлива и др.) последние слабо закрепляются на поверхности алмазов. Доля собирателя (дизельного топлива), закрепившегося на поверхности алмаза, измеренная методом УФ-спектроскопии при длине волны 315 нм, составляет 34%. При использовании в качестве собирателя мазута флотского Ф-5 доля закрепившегося на алмазах собирателя достигает 60,6%. При использовании более конденсированных нефтепродуктов (мазута М-40) доля закрепившегося собирателя снижается до 51,2%. Полученные результаты показывают, что для увеличения количества закрепившегося на алмазах собирателя необходимо использовать средневязкие смеси мазутов и дистиллятов.

Для установления фракционного состава закрепившегося компаундного собирателя снимали ИК-спектры экст-

рационных вытяжек с поверхности алмазов и из жидкой фазы флотационного опыта. Результаты спектральных исследований показали, что при использовании в качестве собирателя низкокипящих нефтепродуктов (керосина, дизельного топлива и др.) алифатические и алициклические углеводороды в близких пропорциях распределяются между алмазами и жидкой фазой, о чем свидетельствует наличие валентных колебаний  $CH_2$  и  $CH_2$  групп (волновые числа 2950, 2924, 2853  $cm^{-1}$ ). После экстракции на поверхности алмазов не сохраняется заметных количеств каких-либо органических веществ. Слабым закреплением легких дистиллятов на поверхности алмазов, вероятно, и объясняется низкая эффективность флотации алмазов с применением в качестве собирателя нефтепродуктов с преобладанием легкокипящих фракций.

Напротив, при использовании собирателей, содержащих значительные доли средне- и высокомолекулярных и ароматических соединений, например мазута, происходит устойчивое закрепление фракций на поверхности (рис. 2, а) и достигается хорошая флотуемость

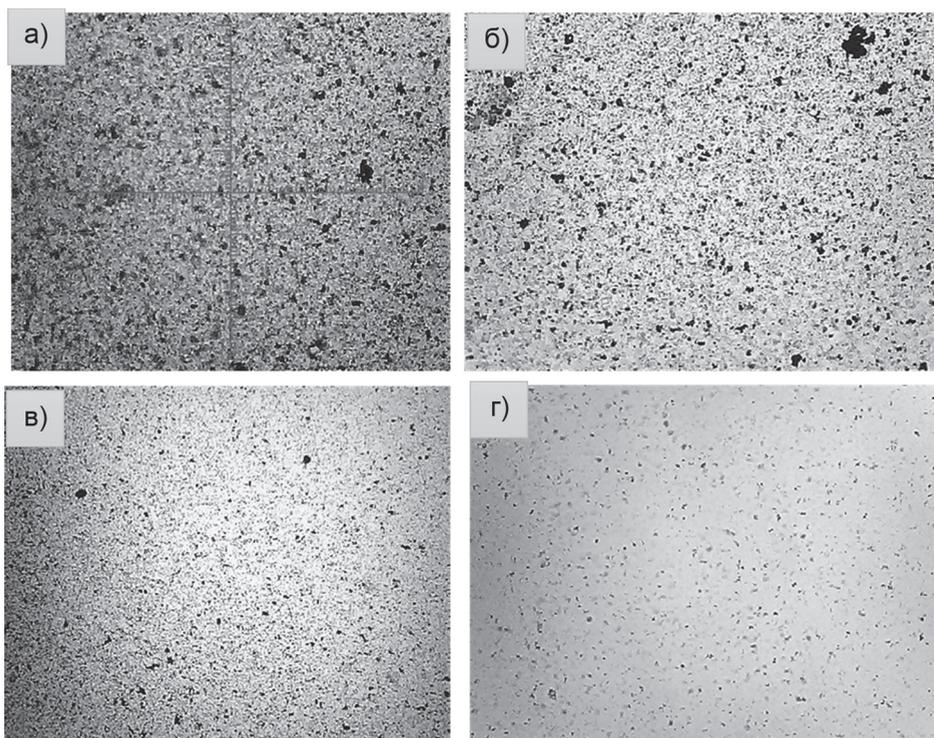


Рис. 2. Снимки тонкого слоя мазута М-40 в режиме комбинированного освещения на микроскопе Микромед-ЛЮМ до (а) и после разбавления дизельной фракцией. Объемная доля дизельной фракции: 10% (б); 20% (в), 30% (г)

Fig. 2. Pictures of thin fuel oil M-40 layer under combined lighting on microscope Micromed Lum before (a) after (b) dilution with diesel fraction. Volume fraction of diesel fraction: 10% (b); 20% (v), 30% (g)

алмазов [3, 15]. После экстракционной обработки сфлотированных алмазов органическими растворителями в экстракте концентрируются низкомолекулярные фракции, а на поверхности алмазов остаются высокомолекулярные смолистые вещества и асфальтены, обнаруживаемые по характеристическим пикам валентных колебаний С–С кольца полициклических (ароматических) углеводородов при волновых числах 1617, 1462 и 1377 см<sup>-1</sup>. Они не удаляются с поверхности алмазов даже при использовании сильных органических растворителей, например четыреххлористого углерода.

Полученные результаты подтверждают, что эффективное закрепление ком-

паундных собирателей на поверхности алмазов достигается в присутствии смолисто-асфальтеновых веществ, необратимо закрепляющихся на поверхности алмазов. При этом маловязкие низкомолекулярные фракции являются транспортным звеном, обеспечивающим доставку высокомолекулярных фракций нефтепродуктов на поверхность алмаза.

Для определения состава собирателей с повышенной собирательной активностью была изучена структура используемых нефтепродуктов и компаундов на их основе с применением метода комбинированной оптической УФ-ВИ-спектроскопии.

Особенностью применяемого метода является возможность диагностировать

наличие в нефтепродукте твердых труднорастворимых компонентов, например, смолистых веществ и асфальтенов. Результаты анализа структуры мазута М-40 при его разбавлении низкомолекулярной фракцией показали, что добавление фракций нефтяных масел и легких дистиллятов приводит к уменьшению количества крупных агломератов, сформированных асфальтовым ядром с большим отношением С/Н, окруженным рядом оболочек из ароматических углеводородов с постепенно понижающимся отношением С/Н за счет их перехода в коллоидную форму и последующего растворения.

При этом анализ изображений показывает, что при добавлении 10% дизельной фракции существенного разрушения асфальтенов не происходит (рис. 2, а, б). При разбавлении на 20 и 30% происходит диспергирование агрегатов асфальтовых кристаллов и растворение их периферийной части с образованием коллоидных систем (рис. 2, в, г).

Растворенные высокомолекулярные компоненты, находящиеся в равновесии с коллоидной формой, обладают высокой адсорбционной и адгезионной спо-

собностью по отношению к минеральной поверхности [16, 17]. Учитывая это, для повышения эффективности собирателя на основе мазута М-40 было предложено перевести его из грубодисперсного состояния в форму коллоидного раствора добавками легких фракций нефтепереработки. Требуемый результат может быть достигнут при определенном соотношении низко-, средне- и высококипящих (тяжелых) фракций, когда создаются условия для растворения и диспергирования агрегатов асфальтенов и смол [17, 18].

Для подтверждения выдвинутой гипотезы и выбора оптимального состава компаундных собирателей был изучен фракционный состав реагентов, применяемых для пенной сепарации алмазов, и получены компаунды, представляющие смесь определенных нефтепродуктов. Так, анализ состава исследованных НП показал, что мазут прямогонный М-40, а также водонефтяная эмульсия рудника «Удачный» ВНЭ-У характеризуются максимальной долей смолистых веществ и асфальтенов (до 45,8% тяжелой фракции). Водонефтяная эмульсия рудника

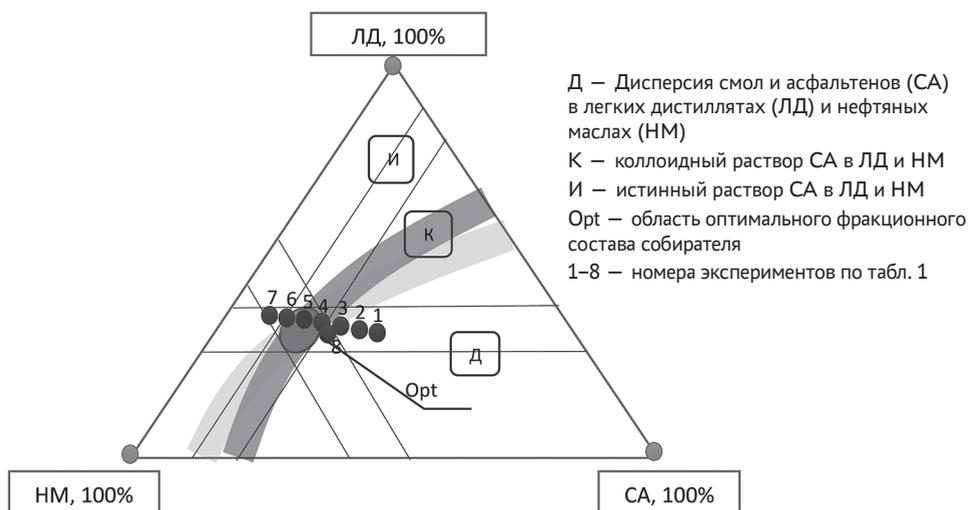


Рис. 3. Диаграмма трехфракционного состава компаундного собирателя

Fig. 3. Diagram of three-fraction composition of compound collector

Таблица 1

**Состав и характеристика собирателей, приготовленных на основе мазута М-40 и дизельного топлива (ДТ)****Composition and characteristics of collectors made of fuel oil M-40 and diesel fuel (DF)**

№	Состав композиции		Плотность, г/см <sup>3</sup>	Динамическая вязкость при 50 °С, мПа·с	T <sub>заст.</sub> , °С	Массовая доля фракций, %*			Извлечение алмазов, %
	М-40	ДТ				ЛД	НМ	СА	
1	100	0	1,053	135,6	+12	10,3	55,5	34,2	78,1
2	90	10	0,981	128,3	+5,3	17,6	51,6	30,8	84,2
3	80	20	0,956	71,7	-1,0	24,9	47,7	27,4	89,5
4	70	30	0,945	36,7	-5,2	32,2	43,8	24,0	92,5
5	60	40	0,935	23,6	-10,1	39,5	39,9	20,6	93,5
6	50	50	0,931	19,2	-17,2	46,8	36,0	17,2	88,4
7	40	60	0,914	14,2	-24,4	54,2	32,1	13,7	83,0
8	Мазут Ф-5		0,948	36,2	-6,0	27,5	42,9	29,6	91,2

\* ЛД — легкие дистилляты; НМ — нефтяные масла; СА — смолы и асфальтены.

«Интернациональный» ВНЭ-10 содержит существенно меньше смол и асфальтенов (28,8%) [19]. С применением компаундных собирателей с различным соотношением легких и тяжелых фракций были выполнены флотационные опыты, которые показали, что наибольшее извлечение алмазов в концентрат пенной сепарации наблюдается при массовой доле легких дистиллятов (ЛД) 35 — 48%, нефтяных масел (НМ) — 32 — 40%, смол и асфальтенов (СА) — 17 — 24% [19]. Область оптимальных соотношений массовых долей нефтяных фракций в компаундном собирателе представлена на тройной диаграмме (см. рис. 3).

Мазут флотский Ф-5, соответствующий требованиям ГОСТ 10585-2013, широко используемый в качестве собирателя в процессах флотации алмазов, по своему составу не является оптимальным по соотношению массовых долей нефтяных фракций. Следовательно, целесообразно его разбавление легкими фракциями переработки нефти. Учитывая, что флотский мазут Ф-5 является

результатом разбавления прямогонных мазутов классической схемы нефтепереработки, исходя из задачи его замены на более доступные продукты, была апробирована смесь мазута М-40 с дизельным топливом в разных соотношениях.

Как видно из данных (табл. 1), физико-химические характеристики полученного компаунда с массовой долей 70 — 80% мазута прямогонного М-40 в смеси весьма близки к мазуту флотскому Ф-5, производимому ООО «Бологое-нефтепродукт», состав которого приближается к оптимальному, но в неполной мере ему соответствует.

Анализ полученных результатов показывает, что область оптимальных соотношений нефтяных фракций в компаундах совпадает с областью перехода грубодисперсной системы в коллоидный раствор смол и асфальтенов в смеси легких дистиллятов и нефтяных масел (см. рис. 3). В этой области, достигаемой разбавлением мазута М-40 на 30 — 40% дизельным топливом, компаундный собиратель проявляет наилучшие технологические свойства.

## Результаты технологических исследований и их обсуждение

Проверка собирательных свойств компаундов проводилась на установке беспенной флотации — трубке Халлимонда. При флотации использовалась навеска алмазов крупностью  $1+0,5$  мм массой 200 мг, расход собирателя составлял 6 мкл (5,5 мг). Время флотации — 4 мин, расход воздуха 50 мл. При агитации алмазов собиратель использовался в виде эмульсии в водной фазе (объем водной фазы — 40 мл). В объем водной фазы добавляли полифосфат натрия.

Результаты флотационных опытов показали, что наибольшее извлечение алмазов достигается именно при рекомендованном фракционном составе собирателя, достигаемом при массовой доле 60—70% мазута М-40 в смеси с дизельным топливом (см. табл. 1).

При пенной сепарации алмазов требуется поддерживать высокий расход собирателя, доходящий до 1000 г/т и более. Кроме увеличения затрат такой расход обуславливает повышенную негативную нагрузку на окружающую среду. Для решения проблемы повышения эффективности реагента-собирателя при флотации алмазов предложено использовать добавки в его состав компонентов, способствующих повышению его собирательной способности за счет формирования тонко диспергированной адгезионно активной фазы [20]. В качестве таких добавок предлагаются органические вещества класса водорастворимых кетонов: диметилкетона и метилэтилкетона. Эти добавки повышают растворимость углеводородов, переводя большую их часть в истинный раствор, образуя при этом устойчивую в водной фазе тонкодисперсную (коллоидную) систему — эмульсию, диаметр капель в которой  $10^{-7}$  м [21]. Такие капли интенсивно закрепляются на поверхности кристаллов алмаза, выполняя функции

мостиков, облегчающих адгезию средних и более крупных капель нефтепродуктов на алмазах при их сближении.

Собиратели КСМ-1 и КСМ-2, представляющие собой компаунды мазута М-40, дизельного топлива и кетонов в разных соотношениях, были испытаны на установке пенной сепарации института «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА». Анализ характера полученных зависимостей показывает, что максимальное извлечение алмазов достигается в области массовой доли фракции кетонов 15—20%. Результаты испытаний показали, что применение собирателей предложенного состава обеспечивает повышение извлечения алмазов на 7,5%.

Требуемые показатели по извлечению алмазов в случае использования собирателей КСМ-1 и КСМ-2 достигаются при существенно меньшем их расходе (500 г/т), чем при использовании базового собирателя — флотского мазута Ф-5, (1000 г/т). Таким образом, решается задача снижения расхода собирателя и, соответственно, сброса нефтепродуктов в окружающую экосистему.

Важным параметром технологического режима пенной сепарации является температура среды в операциях кондиционирования исходного питания с флотореагентами и непосредственно в процессе пенной сепарации [22]. Для определения оптимального температурного режима были выполнены флотационные опыты на трубке Халлимонда при температуре кондиционирования и флотации 10, 14 и 24 °С. Выбранный интервал температур соответствует условиям пенной сепарации на промышленных предприятиях в различное время года. При проведении исследований использовали мазут флотский Ф-5 и его компаунды с дизельной фракцией.

Как видно из результатов, представленных в табл. 2, лучшие результаты достигаются при температуре 14 и 24 °С.

Таблица 2

**Извлечение алмазов с использованием в качестве собирателей мазута флотского, компаундов с дизельной фракцией (ДФ) и Маччобинской нефти при различной температуре**

**Extraction of diamonds with collectors represented by bunker oil, compounds with diesel fraction (DF) and Machchoba oil at different temperature**

Собиратель	Извлечение алмазов в концентрат, %		
	10 °С	14 °С	24 °С
Мазут флотский Ф-5	70,6	74,6	80,5
Нефть Маччобинская дегазированная	67,6	72,6	75,7
Разбавленный мазут Ф-10 (10% ДФ)	75,4	78,4	84,2
Разбавленный мазут Ф-14 (14% ДФ)	76,0	77,9	83,2

При 14 °С извлечение алмазов в концентрат составило 78,4% и 77,9% при использовании соответственно разбавленных мазутов Ф-10 и Ф-14, полученных разбавлением мазута Ф-5 дизельной фракцией с объемной долей дизельной фракции 10% и 14%, что на 2,8%–3,7% выше, чем у лучшего базового собирателя — мазута Ф-5 (табл. 2).

Извлечения алмазов в концентрат, достигнутые при проведении процесса беспенной флотации в условиях температуры процесса 24 °С с использованием реагентов-собирателей на основе мазута флотского Ф-5, превышают соответствующие значения извлечений при температуре процесса флотации 14 °С в среднем на 3,5–5,5% (см. табл. 2).

Полученные результаты были проведены на установке пенной сепарации, работающей в близком к промышленному режиму (расход собирателя 1000 г/т, расход бутилового аэрофлота 50 г/т, расход вспенивателя — 150 г/т). Результаты стендовых испытаний показали, что в интервале температур 14–24 °С достигается извлечение алмазов 85–90% при селективности 82,2–88,5%. Дальнейшее повышение температуры увеличивает извлечение алмазов на 1,5–3%, однако при этом увеличивается выход в концентрат минералов кимберлита и снижается селективность процесса. Сниже-

ние температуры до 10 °С снижает извлечение алмазов на 2,5–5%, что делает необходимым использование систем подогрева оборотной воды и собирателя при снижении температуры вследствие неблагоприятных климатических воздействий.

### Выводы

С использованием экстракционно-спектральной методики определены закономерности распределения низко- и высокомолекулярных фракций собирателя между твердой и жидкой фазами в процессе пенной сепарации и установлена важная роль закрепления фракции смол и асфальтенов на поверхности алмазов.

С использованием нового методического подхода к выбору состава многокомпонентного собирателя определены соотношения между долями мазута М-40 (60–70%) и дизельного топлива (30–40%), обеспечивающие оптимальный фракционный состав собирателя. При использовании компаундных собирателей оптимального фракционного состава на основе мазута М-40 и дизельного топлива достигнуто повышение извлечения алмазов на 2,7–3,5%.

Разработаны собиратели КСМ-1 и КСМ-2 на основе мазута М-40, дизельной фракции и органических диспергии-

рующих присадок группы кетонов, обеспечивающие повышенное извлечение алмазов за счет диспергирования реагента в водной фазе с получением коллоидного раствора.

Разработанные собиратели прошли апробацию на установке пенной сепарации и показали возможность увеличе-

ния извлечения алмазов в концентрат на 5–7,5%. Выбран интервал температур 14–24 °С для операций кондиционирования исходного рудного питания и процесса пенной сепарации, обеспечивающий максимальное извлечение алмазов в концентрат при высокой селективности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. *Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Бунин И. Ж., Миненко В. Г., Коваленко Е. Г., Подкаменный Ю. А.* Комбинированные процессы извлечения алмазов из метасоматически измененных кимберлитовых пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2017. — № 2. — С. 117–127.

3. *Злобин М. Н.* Технология крупнозернистой флотации при обогащении алмазосодержащих руд // Горный журнал. — 2011. — № 1. — С. 87–89.

4. *Махрачев А. Ф., Двойченкова Г. П., Лезова С. П.* Исследование и оптимизация состава компаундных собирателей для пенной сепарации алмазов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 11. — С. 178–185. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-178-185.

5. *Коваленко Е. Г.* Обоснование и выбор условий удаления минеральных пленок с поверхности алмаза при тепловой обработке / Материалы международной конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья». — Екатеринбург, 2014. — С. 170–173.

6. *Двойченкова Г. П., Морозов В. В., Чантурия Е. Л., Коваленко Е. Г.* Выбор параметров электрохимического кондиционирования оборотной воды при подготовке алмазосодержащих кимберлитов к пенной сепарации // Горные науки и технологии. — 2021. — № 6(3). — С. 170–180. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-170-180.

7. *Lijun Liu, Gan Cheng, Wei Yu, Chao Yang* Flotation collector preparation and evaluation of oil shale // Oil Shale. 2018, vol. 35, no. 3, pp. 242–251. DOI: 10.3176/oil.2018.3.04.

8. *Hao F., Davey K. J., Bruckard W. J., Woodcock J. T.* Online analysis for xanthate in laboratory flotation pulps with a UV monitor // International Journal of Mineral Processing. 2008, vol. 89, no. 1–4, pp. 71–75. DOI: 10.1016/j.minpro.2008.07.004.

9. *Adeniji A. O., Okoh O. O., Okoh A. I.* Analytical methods for the determination of the distribution of total petroleum hydrocarbons in the water and sediment of aquatic systems: a review // Hindawi Journal of Chemistry. 2017, vol. 2017, pp. 1–13. DOI: 10.1155/2017/5178937.

10. *Vershinin V. I., Petrov S. V.* The estimation of total petroleum hydrocarbons in waste waters by multiwave IR spectrometry with multivariate calibrations // Talanta. 2016, vol. 148, p. 163. DOI: 10.1016/j.talanta.2015.10.076.

11. *Yang Sing Leong, Pin Jern Ker, Jamaludin M. Z., Nomanbhay S. M., Ismail A., Abdullah F., Hui Mun Looe, Chin Kim Lo* UV-Vis Spectroscopy: a new approach for assessing the color index of transformer insulating oil // Sensors. 2018, vol. 18, no. 7, article 2175. DOI: 10.3390/s18072175.

12. *Thompson J. M.* Infrared Spectroscopy. 2018, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. 196 p.

13. *Алексеев В. В., Воронов Д. В., Каташевцев М. Д., Пахомовский А. Н.* Исследование гранулометрического состава эмульсий с помощью оптического микроскопа и ме-

тодом автоматизированного распознавания объектов на цифровой фотографии // Вестник ИрГТУ. — 2015. — № 2(97). — С. 99–104.

14. *Evdokimov I. N., Losev A.* Potential of UV-visible absorption spectroscopy for characterizing crude petroleum oils // *Oil and Gas Business*, 2007.

15. *Махрачев А. Ф.* Повышение эффективности реагентов-собирателей для флотации алмазов на основе виброструйной магнитной активации / Труды XXIII международной конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья». — Екатеринбург, 2018. — С. 122–126.

16. *Kasomo R. M., Ombiro S., Rop B., Mutua N. M.* Investigation and comparison of emulsified diesel oil and flomin C 9202 as a collector in the benefit of ultra fine coal by aggro-floitation // *International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering*. 2018, vol. 6, no. 4, pp. 74–80. DOI: 10.11648/j.ogce.20180604.15.

17. *Галимова Г. А., Юсупова Т. Н., Ибрагимова Д. А., Якупов И. Р.* Состав, свойства, структура и фракции асфальтенов нефтяных дисперсных систем // Вестник технологического университета. — 2015. — Т. 18. — № 20. — С. 60–64.

18. *Петухов В. Н., Скоробогатова А. А., Ильясова А. З.* Исследование флотационной активности реагентов-собирателей различного группового химического состава при флотации углей // Теория и технология металлургического производства. — 2017. — № 1. — С. 16–19.

19. *Морозов В. В., Лезова С. П.* Применение комбинированных собирателей на основе нефтепродуктов для пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 12. — С. 137–146. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-137-146.

20. *Келбалиев Г. И., Расулов С. Р., Тагиев Д. Б., Мустафаева Г. Р.* Механика и реология нефтяных дисперсных систем. — М.: Изд-во «Маска», 2017. — 462 с.

21. *Abdulredha M. M., Hussain S. A., Abdullah L. C.* Overview on petroleum emulsions, formation, influence and demulsification treatment techniques // *Arabian Journal of Chemistry*. 2020, vol. 13, pp. 3403–3428. DOI: 10.1016/j.arabj.2018.11.014.

22. *Верхотурова В. А., Елшин И. В., Немаров А. А., Толстой М. Ю., Островская Г. Х., Федотов К. В., Шеломенцева Т. В.* Научное обоснование и выбор оптимального варианта по восстановлению гидрофобных свойств поверхности алмазов из руды трубки «Интернациональная» // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2014. — № 8(91). — С. 50–56. **МИАБ**

## REFERENCES

1. 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.

2. Chanturiya V. A., Dvoichenkova G. P., Bunin I. Zh., Kovalenko E. G., Podkamenny Yu. A. Combined processes of diamond extraction from metasomatically altered kimberlite rocks. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2017, no. 2, pp. 117–127. [In Russ].

3. Zlobin M. N. Technology of coarse-grained flotation in the enrichment of diamond-bearing ores. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 1, pp. 87–89. [In Russ].

4. Makhraчев A. F., Dvoychenkova G. P., Lezova S. P. Analysis and optimization of compositions of compound collectors for frother separation of diamonds. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 11, pp. 178–185. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-178-185.

5. Kovalenko E. G. Justification and choice of conditions for removing mineral films from the diamond surface during heat treatment. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya»* [Proceedings of the international con-

ference «Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials»], Ekaterinburg, 2014, pp. 170 – 173. [In Russ].

6. Dvoychenkova G. P., Morozov V. V., Chanturia E. L., Kovalenko E. G. Selection of recycled water electrochemical conditioning parameters for preparation of diamond-bearing kimberlite for froth separation. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, no. 6(3), pp. 170 – 180. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-170-180.

7. Lijun Liu, Gan Cheng, Wei Yu, Chao Yang Flotation collector preparation and evaluation of oil shale. *Oil Shale*. 2018, vol. 35, no. 3, pp. 242 – 251. DOI: 10.3176/oil.2018.3.04.

8. Hao F., Davey K. J., Bruckard W. J., Woodcock J. T. Online analysis for xanthate in laboratory flotation pulps with a UV monitor. *International Journal of Mineral Processing*. 2008, vol. 89, no. 1 – 4, pp. 71 – 75. DOI: 10.1016/j.minpro.2008.07.004.

9. Adeniji A. O., Okoh O. O., Okoh A. I. Analytical methods for the determination of the distribution of total petroleum hydrocarbons in the water and sediment of aquatic systems: a review. *Hindawi Journal of Chemistry*. 2017, vol. 2017, pp. 1 – 13. DOI: 10.1155/2017/5178937.

10. Vershinin V. I., Petrov S. V. The estimation of total petroleum hydrocarbons in waste waters by multiwave IR spectrometry with multivariate calibrations. *Talanta*. 2016, vol. 148, p. 163. DOI: 10.1016/j.talanta.2015.10.076.

11. Yang Sing Leong, Pin Jern Ker, Jamaludin M. Z., Nomanbhay S. M., Ismail A., Abdullah F., Hui Mun Looe, Chin Kim Lo UV-Vis Spectroscopy: a new approach for assessing the color index of transformer insulating oil. *Sensors*. 2018, vol. 18, no. 7, article 2175. DOI: 10.3390/s18072175.

12. Thompson J. M. *Infrared Spectroscopy*. 2018, Pan Stanford Publishing Pte. Ltd. 196 p.

13. Alekseenko V. V., Voronov D. V., Katashevstev M. D., Pakhomovskiy A. N. Investigation of the granulometric composition of emulsions using an optical microscope and automated object recognition in digital photography. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015, no. 2(97), pp. 99 – 104. [In Russ].

14. Evdokimov I. N., Losev A. *Potential of UV-visible absorption spectroscopy for characterizing crude petroleum oils*. Oil and Gas Business, 2007.

15. Makhachev A. F. Improving the efficiency of collecting reagents for diamond flotation based on vibro-jet magnetic activation. *Trudy XXIII mezhdunarodnoy konferentsii «Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya»* [Proceedings of the XXIII International Conference «Science fundamentals and practice of processing ores and man-made raw materials»], Ekaterinburg, 2018, pp. 122 – 126. [In Russ].

16. Kasomo R. M., Ombiro S., Rop B., Mutua N. M. Investigation and comparison of emulsified diesel oil and flomin C 9202 as a collector in the benefit of ultra fine coal by aggro-flotation. *International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering*. 2018, vol. 6, no. 4, pp. 74 – 80. DOI: 10.11648/j.ogce.20180604.15.

17. Galimova G. A., Yusupova T. N., Ibragimova D. A., Yakupov I. R. Composition, properties, structure and fractions of asphaltenes of oil dispersed systems. *Bulletin of the Technological University*. 2015, vol. 18, no. 20, pp. 60 – 64. [In Russ].

18. Petukhov V. N., Skorobogatova A. A., Ilyasova A. Z. Investigation of flotation activity of reagents-collectors of various group chemical composition during coal flotation. *Theory and Technology of Metallurgical Production*. 2017, no. 1, pp. 16 – 19. [In Russ].

19. Morozov V. V., Lezova S. P. Compound collectors based on oil products for frother separation of diamond-bearing kimberlites. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 12, pp. 137 – 146. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-137-146.

20. Kelbaliev G. I., Rasulov S. R., Tagiev D. B., Mustafaeva G. R. *Mekhanika i reologiya neftyanykh dispersnykh sistem* [Mechanics and rheology of petroleum dispersed systems], Moscow, Izd-vo «Maska», 2017, 462 p.

21. Abdulredha M. M., Hussain S. A., Abdullah L. C. Overview on petroleum emulsions, formation, influence and demulsification treatment techniques. *Arabian Journal of Chemistry*. 2020, vol. 13, pp. 3403 – 3428. DOI: 10.1016/j.arabjc.2018.11.014.

22. Verkhoturova V. A., Elshin I. V., Nemarov A. A., Tolstoy M. Yu., Ostrovskaya G. H., Fedotov K. V., Shelomentseva T. V. Scientific substantiation and selection of the optimal option for restoring the hydrophobic properties of the surface of diamonds from the ore of the «International» tube. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014, no. 8(91), pp. 50–56. [In Russ].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Морозов Валерий Валентинович*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: dchmggu@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4105-944X,

*Пестряк Ирина Васильевна*<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор, e-mail: spestryak@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1745-6579,

*Коваленко Евгений Геннадьевич* — канд. техн. наук, главный инженер, Институт «Якутнипроалмаз», e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru,

*Лезова Светлана Павловна*<sup>1</sup> — старший преподаватель, e-mail: svlezova@mail.ru,

*Поливанская Валерия Владимировна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: vpolivaskaya@mail.ru,

<sup>1</sup> НИТУ «МИСиС».

**Для контактов:** Морозов В.В., e-mail: dchmggu@mail.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.V. Morozov*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: dchmggu@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-4105-944X,

*I.V. Pestryak*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: spestryak@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1745-6579,

*E.G. Kovalenko*, Cand. Sci. (Eng.), Chief Engineer, e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru,

«Yakutnioproalmaz» Institute, 678174, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia,

*S.P. Lezova*<sup>1</sup>, Senior Lecturer, e-mail: svlezova@mail.ru,

*V.V. Polivanskaya*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: vpolivaskaya@mail.ru,

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

**Corresponding author:** V.V. Morozov, e-mail: dchmggu@mail.ru.

Получена редакцией 01.04.2022; получена после рецензии 30.05.2022; принята к печати 10.07.2022.

Received by the editors 01.04.2022; received after the review 30.05.2022; accepted for printing 10.07.2022.

