

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СОБИРАТЕЛЕЙ И ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПЕННОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ КИМБЕРЛИТОВ

Е.Г. Коваленко<sup>1</sup>, В.В. Морозов<sup>2</sup>, Г.П. Двойченкова<sup>3,4</sup>, А.Д. Бабушкина<sup>1</sup>, В.А. Чуть-Ды<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

<sup>2</sup> НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail dchmggu@mail.ru

<sup>3</sup> Институт проблем комплексного освоения недр РАН (ИПКОН РАН), Москва, Россия

<sup>4</sup> Мирнинский политехнический институт – филиал Северо-Восточного  
федерального университета им. М.К. Аммосова, Мирный, Россия

**Аннотация:** Цель исследования заключается в повышении эффективности процессов флотационного обогащения мелких классов алмазосодержащих кимберлитов на основе выбора взаимосвязанных реагентных и температурных режимов вспомогательных и основных процессов, направленных на улучшение закрепления собирателя и повышение флотуемости алмазов. Требуемый результат достигается при добавках в апольярный собиратель низко- и среднемолекулярных фракций нефти и легкой нефти с высокой массовой долей таких фракций, а также добавках поверхностно-активных веществ с диспергирующими свойствами по отношению к собирателю в водную фазу флотационной пульпы. Проведенными физико-химическими исследованиями показано, что разбавление мазутов низко- и среднемолекулярными фракциями нефти, добавками маслорастворимых поверхностно-активных веществ, а также нагрев собирателя до температуры 35–50 °С приводит к изменению его фазового состояния, и в первую очередь – к переводу асфальтен-смолистых фракций в растворенную форму. При этом улучшается эффективность диспергирования собирателя в водной фазе в операции кондиционирования флотуемого материала с реагентами. Повышение активности собирателя происходит также при добавках в водную фазу водорастворимых поверхностно-активных веществ с диспергирующими свойствами. Проведенными флотационными исследованиями обоснована эффективность применения модифицированных собирателей, исследованных режимов реагентной и тепловой обработки водно-минеральных дисперсных систем, а также определены условия их комбинирования для повышения флотуемости и снижения потерь алмазов в процессе пенной сепарации. Промышленная апробация модифицированных собирателей подтвердила их эффективность в операциях пенной сепарации в широком диапазоне температур пульпы и установила возможность достижения роста извлечения алмазов на 1,1–2,9%.

**Ключевые слова:** алмазы, кимберлиты, гидрофобизация, кондиционирование, флотация, модифицированный собиратель, диспергаторы, тепловая обработка.

**Для цитирования:** Коваленко Е. Г., Морозов В. В., Двойченкова Г. П., Бабушкина А. Д., Чуть-Ды В. А. Оптимизация состава собирателей и температурного режима пенной сепарации при обогащении алмазосодержащих кимберлитов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 4. – С. 136–150. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_4\_0\_136.

---

## Optimizing composition of collectors and temperature conditions of froth separation in processing of diamond-bearing kimberlites

E.G. Kovalenko<sup>1</sup>, V.V. Morozov<sup>2</sup>, G.P. Dvoichenkova<sup>3,4</sup>, A.L. Babushkina<sup>1</sup>, V.A. Chut-Dy<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Yakutniproalmaz Institute, JSC ALROSA (PJSC), Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Russia

<sup>2</sup> NUST MISIS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Institute of Problems of Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

<sup>4</sup> Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

---

**Abstract:** The aim of the study is to enhance efficiency of flotation for fine diamond-bearing kimberlite grains through careful selection of interconnected reagent and temperature conditions for the primary and secondary processes toward improved attachment of a collector and better floatability of diamonds. The required result is achieved when an apolar collector is added with low- and medium-polymeric fractions of oil and low-density oil with a high percentage of such fractions by weight, and in case of adding surfactants with dispersing properties relative to a collector in water phase of flotation pulp. The implemented physicochemical research shows that cutting of fuel oils with light and medium-molecular weight fractions of oil, or addition of slightly soluble surfactants, as well as heating of a collector to the temperature of 35–50 °C changes the phase of the latter, and first of all, solubilizes asphaltene-tarry fractions. In this case, efficiency of dispersion of the collector in the water phase increases in operation of seasoning of a float material with the reagents. Activity of collecting agents also rises when the water phase is introduced with the water-soluble surfactants possessing dispersing properties. The flotation tests proved efficiency of the modified collectors and tested conditions of the reagent and heat treatment of water–mineral dispersion systems, and also determined conditions of their combination toward enhanced floatability and reduced loss of diamonds in froth separation. The commercial testing of the modified collectors confirmed their efficiency in froth separation in a wide range of temperatures of flotation pulps and fortified the increase in the diamond recovery by 1.1–2.9%.

**Key words:** diamonds, kimberlites, hydrophobization, seasoning, flotation, modified collector, dispersers, heat treatment.

**For citation:** Kovalenko E. G., Morozov V. V., Dvoichenkova G. P., Babushkina A. L., Chut-Dy V. A. Optimizing composition of collectors and temperature conditions of froth separation in processing of diamond-bearing kimberlites. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026; (4):136-150. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_4\_0\_136.

---

### Введение

Технология пенной сепарации алмазосодержащего сырья, разработанная под руководством к.т.н. М.Н. Злобина в 1960-е годы, остается главным способом извлечения мелких классов алмазов на предприятиях АК «АЛРОСА» [1, 2]. С использованием пенной сепарации достигается обогащение класса –2+0,5 мм,

в котором концентрируется более 40% от общего количества алмазов в руде, что составляет до 8% от стоимости всей товарной продукции.

Важным ресурсом повышения выпуска мелких алмазов является снижение потерь на переделах пенной сепарации, достигающих 20%, причиной которых является недостаточная эффективность

гидрофобизации алмазов применяемыми собирателями [3, 4]. Условием снижения потерь алмазов является обеспечение эффективного режима гидрофобизации и флотации алмазов, что достигается применением модифицированных собирателей, реагентов-регуляторов, оптимального температурного режима, физических и физико-химических способов обработки рудного материала [5–7].

Причинами снижения извлечения алмазов также является недостаточная интенсивность взаимодействия аполярного собирателя с поверхностью кристаллов алмазов, что обусловлено слабой степенью диспергирования, малой адгезионной активностью применяемых в качестве собирателей мазутов [4, 7]. Для эффективного закрепления собирателя на поверхности алмазов и снижения влияния температурных факторов на эффективность процесса пенной сепарации целесообразно использование специальных добавок в собиратели, а также и реагентов-регуляторов, повышающих эффективность применяемых собирателей [8, 9].

Оптимизация режимов пенной сепарации предполагает выбор оптимального температурного режима в операциях кондиционирования алмазосодержащего материала с реагентами и в процессе пенной сепарации. Наряду с выбором оптимального температурного режима пенной сепарации алмазов одновременно должна решаться задача выбора оптимального фракционного состава применяемого собирателя, в частности соотношения в нем высокомолекулярных и низкомолекулярных фракций. Анализ проведенных исследований позволяет предположить, что, в зависимости от температуры среды, целесообразно корректировать состав и свойства применяемого в процессе пенной сепарации собирателя, поскольку имеет место су-

щественное влияние данных факторов на параметры его структуры и вязкости [10–12].

В соответствии с изложенным для решения задачи прочного и селективного закрепления собирателя на алмазах и их селективной флотации необходимо не только применять собиратели с улучшенными технологическими свойствами, но и проводить выбор взаимосвязанных реагентных и температурных режимов в операциях кондиционирования рудной пульпы и в процессе пенной сепарации.

### **Методики исследований**

Определение фазового состава и структуры собирателей проводили с использованием оптической микроскопии [13]. На микроскопе «Микромед-3-ЛЮМ» фиксировали изображения тонкого слоя собирателя. Оптиметрический анализ гранулометрических характеристик агрегатов асфальтенов и нефтяных смол, парафиновых фракций проводился с использованием программного пакета VideoTec T 4.0 [Video Tes T-Master (Structure) 4.0: specification. Saint-Petersburg, 2002, 15 p.]. Применение методики позволяет определять в собирателе массовую долю твердых форм асфальтенов и нефтяных смол.

При выборе состава собирателей контролировали их вязкость и способность образовывать устойчивые эмульсии. Для измерений вязкости собирателей использовали вибрационный вискозиметр SV-100 [SV series oscillatory viscometer. Operation manual. Technical data sheet. AND, Japan. [https://and.nt-rt.ru/images/manuals/SV-10\\_100\\_vaszimetri.pdf](https://and.nt-rt.ru/images/manuals/SV-10_100_vaszimetri.pdf). Last accessed date: October 31, 2025]. Образование устойчивой эмульсии собирателя фиксировали по данным измерения оптической плотности на спектрофотометр ПЭ-5400 ВИ [Спектрофотометр ПЭ-5400ВИ. Экросхим.

<https://ecohim.ru/good/spektrofotometry-i-aksessuary/spektrofotometr-pe-5400vi>].

Исследование эффективности модифицированных собирателей и реагентных режимов проводили с применением установки беспенной флотации [14]. При флотации алмазов использовали навеску массой 200 мг и крупностью от 0,5 до 1 мм. Флотацию проводили в течение 4 мин при расходе воздуха 50 мл. Перед флотацией проводили кондиционирование алмазной навески в эмульсии собирателя. Также в трубке Халлимонта проводили флотацию алмазо-кимберлитовой смеси. Особенностью применяемой методики было использование навесок алмазов и кимберлита разной крупности, что обеспечивало возможность разделения алмазов и кимберлита в концентрате и хвостах флотации с расчетом баланса по каждой фракции.

Укрупненные испытания режимов пенной сепарации с использованием модифицированных собирателей проводили на автоматизированной установке пенной сепарации ЛФМ-001С института «Якутнипроалмаз» [15]. При проведении экспериментов пробу крупностью от 1,2 до 1,5 мм обесшламмливали, после чего проводили ее кондиционирование с собирателем. После кондиционирования проба подавалась на пенный слой сепаратора. Полученные в результате флотации пенный и камерный продукты дренировали от водной фазы, которая возвращалась в бак оборотной воды. Извлеченные из концентрата и хвостов алмазы и оставшийся кимберлит взвешивались, и балансовым способом проводился расчет извлечений.

#### **Повышение эффективности пенной сепарации изменением фракционного состава собирателя**

Применяемые при пенной сепарации мазуты недостаточно эффективны. Это

обусловлено тем, что требования к их составу и свойствам определяются запросами потребителей, которыми являются предприятия энергетики и транспорта. Проведенными ранее исследованиями было показано, что мазуты Ф-5 и М-40, как и другие темные нефтепродукты, содержат большое количество инактивных фракций в твердом агрегатном состоянии [16, 17]. Улучшение свойств таких собирателей достигается путем добавок низко- и среднемолекулярных углеводородов — продуктов нефтепереработки [18, 19].

Для установления закономерностей изменения фазового состава структуры собирателя при его разбавлении и последующего выбора фракционного состава были проведены исследования на мазуте М-40 с применением метода комбинированной оптической микроскопии. Задачей исследований было количественное определение фазовых переходов кристаллических и коллоидных форм труднорастворимых компонентов, например при растворении фракции асфальтенов и нефтяных смол [12, 18].

В соответствии с результатами физико-химических исследований для повышения собирательной способности было предложено модифицировать исходные мазуты добавками легких фракций нефтепереработки и маслорастворимыми поверхностно-активными веществами (ПАВ).

Для выбора наилучшей добавки в собиратель были исследованы компаундные собиратели на основе мазута М-40 с добавками дизельной технологической фракции (ДФ), изопропилового спирта (ИПС), реагента Оксипав А1218 (Окс), пропиленгликоля (ПГ) и этилацетата (ЭА). Выбор реагентов был обусловлен их хорошей растворимостью в мазуте, а также способностью растворять высокомолекулярные фракции [15, 18, 19].

Результаты анализа структуры собирателей, применяемых при флотации алмазов, показали, что добавление этилацетата в мазут приводит к уменьшению количества крупных кристаллов или агломератов асфальтенов и нефтяных смол (АСФ) вследствие перехода в коллоидную форму и последующего растворения (рис. 1).

Анализ изображений, проведенный с использованием программного пакета «ВидеоТесТ» 4.0, показывает, что при добавлении этилацетата до массовой доли 25% происходит уменьшение доли твердой фазы АСФ вследствие ее рас-

творения в добавляемых углеводородах (рис. 2).

Гранулометрическая характеристика твердой фазы АСФ при разбавлении существенно изменяется и характеризуется переходом преимущественно в мелкокристаллическую и коллоидную фазу (рис. 3).

Схожие зависимости наблюдаются при разбавлении мазута М-40 другими исследованными реагентами класса маслорастворимых ПАВ.

Наряду с изменением фазового состава наблюдается уменьшения вязкости собирателя (см. табл. 1). Приобретенные

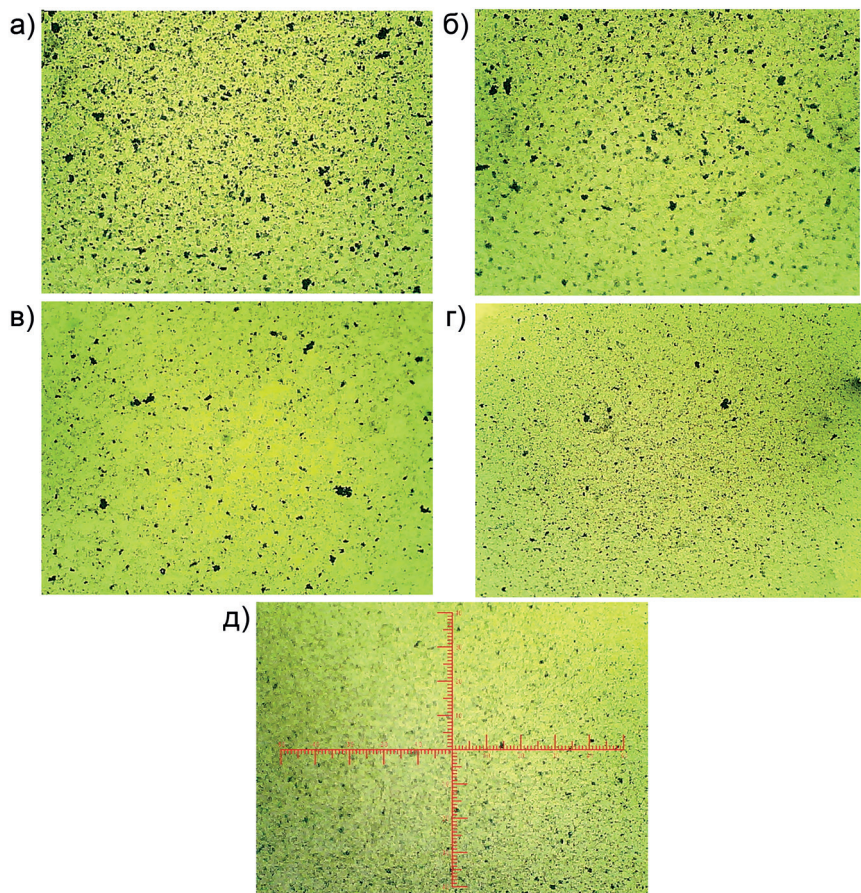


Рис. 1. Снимки тонкого слоя мазута М-40 на микроскопе Микромед-3-ЛЮМ: до разбавления этилацетатом (а); после разбавления этилацетатом на 10, 15, 20 и 25% соответственно (б – д)

Fig. 1. Images of a thin layer of M-40 fuel oil in combined illumination regime on a Micromed-3-LYuM microscope: before dilution with ethyl acetate (a); after dilution by 10, 15, 20, and 25% (b – d)

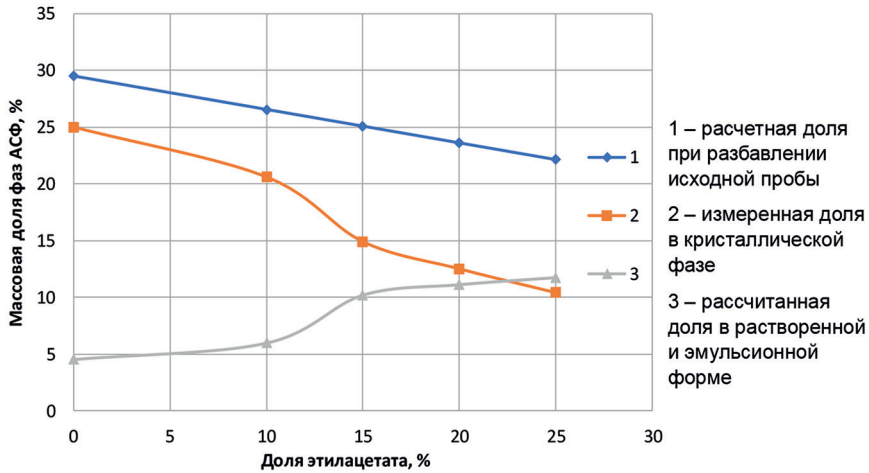


Рис. 2. Изменение доли фаз АСФ при разбавлении мазута М-40 этилацетатом  
 Fig. 2. Change in the proportion of ARF phases when diluting M-40 fuel oil with ethyl acetate

значения вязкости лежат вблизи и в интервале значений (10,5 до 18,5 мПа·с при 50 °С), рекомендованных в диссертационной работе А.Ф. Махрачева [19]. Снижение вязкости собирателя является причиной его более эффективного эмульгирования и, соответственно, повышенной адгезионной активности по отношению к флотируемым минералам.

Селективность процесса флотации (СПФ) рассчитывалась по уравнению

$$\text{СПФ} = \varepsilon_{\text{алм}} - 3 \varepsilon_{\text{кимб}}$$

где  $\varepsilon_{\text{алм}}$ ;  $\varepsilon_{\text{кимб}}$  – извлечение алмазов и кимберлита в концентрат.

Полученные результаты показали, что компаундные собиратели на основе мазута М-40, полученные путем его раз-

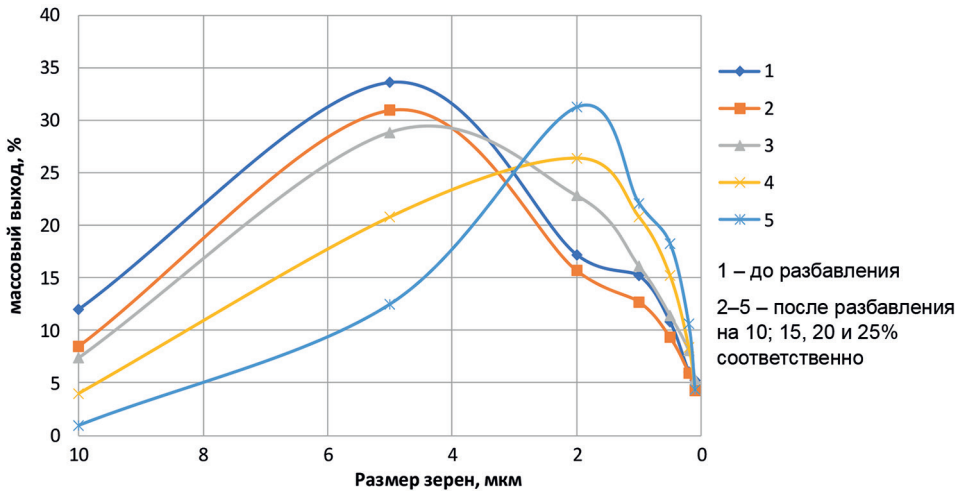


Рис. 3. Гистограммы массового распределения твердой фазы фракции асфальтенов и нефтяных смол по крупности при разбавлении мазута М-40 этилацетатом  
 Fig. 3. Histograms of the mass distribution of ARF solid phase by size class when M-40 fuel oil is diluted with ethyl acetate

Таблица 1

**Показатели флотации смеси алмазов и кимберлита с модифицированными собирателями на основе М-40**

**Performance of diamond and kimberlite mixture flotation with modified collectors based on M-40**

№	Собиратель	Состав собирателя	Динамическая вязкость, мПа·с при 50 °С	Извлечение алмазов, %	Извлечение кимберлита, %	СПФ, %
1	М-40 без добавки	М-40	130,2	61,81	1,01	58,77
2	М-40 (ДТФ)	М-40 + 35% ДТФ	18,2	72,44	1,11	69,11
3	М-40(ИПС)	М-40 + 15% ИПС	20,3	70,75	0,86	68,17
4	М-40(Окс)	М-40 + 15% Оксипав 30	13,4	72,30	1,08	69,06
5	М-40(ПГ)	М-40 + 15% ПГ	20,3	69,39	2,59	61,61
6	М-40 (ЭА)	М-40 + 15% ЭА	19,3	71,72	1,44	67,39

бавления дизельной технологической фракцией и маслорастворимыми ПАВ, выбранными для эксперимента, обеспечивают существенное повышение извлечения алмазов и селективности процесса флотации (табл. 1).

**Выбор реагентов-диспергаторов собирателя класса водорастворимых ПАВ**

Ранее проведенные исследования показали эффективность применения для интенсификации процессов обесшламливания алмазов и снижения флотируемости гидрофобных минералов кимберлита реагентов различных классов — полифосфата натрия, оксиэтилендифосфоновой кислоты (ОЭДФ), а также метасиликата натрия [15]. В настоящей работе проведено изучение влияния на селективность флотации алмазов ряда органических реагентов, которые используются в различных отраслях промышленности в качестве диспергаторов и компонентов моющих средств. Основная задача испытываемых реагентов — повышение эффективности закрепления собирателя на алмазах без интенсификации закрепления собирателя на кимберлите.

Примененная методика исследований включала флотацию смеси алмазов и

кимберлита (150+150 мг) в трубке Халлимонда. Применялся собиратель — мазут М-40, модифицированный реагентом Оксипав А1218 (15%) при концентрации 100 мг/л. Опыты проводились на оборотной воде ОФ № 3 Мирнинско-Нюрбинского ГОКа. Концентрация реагентов-диспергаторов составила 100 мг/л.

Оценка влияния модифицирующих добавок на эффективность диспергирования собирателя проводилась методом фотоколориметрии на спектрофотометре ПЭ5400ВИ. В условиях проводимых измерений количество диспергированного собирателя было прямо пропорционально поглощению светового потока аликвотой водной фазы с диспергированным собирателем в диапазоне волновых чисел 500 — 650 нм. Все исследованные реагенты показали существенно лучшие, чем триполифосфат натрия (ТПФ), результаты по интенсивности диспергирования собирателя, оцениваемой по его оптической плотности (см. табл. 2).

Наилучшие результаты флотационных опытов (извлечение алмазов и селективность) были получены для реагентов ПЭГ 400, ПЭГ 1500, ОП-4А (см. табл. 2). Извлечение алмазов и селективность флотации заметно превысили

Таблица 2

**Показатели диспергируемости собирателя и флотации смеси алмазов и обесшламленного кимберлита при использовании добавок в водную фазу ПАВ класса диспергаторов**

*Dispersibility and flotation performance indicators of a mixture of diamonds and deslimed kimberlite using surfactant dispersing agents added to the aqueous phase*

№	Диспергаторы	Поглощение светового потока эмульсией собирателя, %	Извлечение алмазов, %	Извлечение кимберлита, %	Селективность
1	Диэтиленгликоль	65,4	77,24	3,04	68,13
2	ПЭГ 400	77,3	83,11	2,64	75,19
3	ПЭГ 1500	74,3	84,93	2,89	76,27
4	Сульфолон	89,5	82,31	4,56	68,64
5	ОП-4А	87,5	82,88	2,39	75,71
6	Контрольный опыт с ТПФ	23,0	75,17	1,49	70,70

показатели, получаемые при использовании стандартного режима с добавками триполифосфата (табл. 2, контрольный опыт с ТПФ). Полученный результат дает основания для применения реагентов-диспергаторов в качестве добавок в водную фазу в процессе пенной сепарации.

### **Влияние температуры на свойства собирателя и флотиремость алмазов**

Температура пульпы в подготовительных и основных технологических операциях основной сепарации является важным фактором, определяющим конечные технологические показатели [3, 5, 20]. Особенно сильно снижаются показатели пенной сепарации при ведении процесса в холодный период при температуре воды менее 14 °С. Кроме снижения температуры среды в операциях кондиционирования и пенной сепарации вероятной причиной снижения технологических показателей является изменение фазового состава и структуры мазутов при низких, часто отрицательных, температурах. Для определения причин снижения эффективности флотации алмазов были проведены исследова-

ния фазового состава и структуры мазута флотского Ф-5, используемого в качестве собирателя в широком диапазоне температур.

Анализ результатов исследований, проведенных методом оптической микроскопии на микроскопе «Микромед-3-ЛЮМ», показал, что при температуре –10 °С в мазуте флотском Ф-5 выкристаллизовываются фазы асфальтена и нефтяных смол, парафинов, а также формируются капли среднемолекулярных фракций углеводородов. При нагревании до температуры +10 °С низко- и среднемолекулярные нефтяные фракции мазута флотского взаимно растворяются, а кристаллы АСФ и парафинов сохраняются. При 24 °С оптически различаемые твердые образования парафинов исчезают. При нагреве до 50 °С существенно уменьшается количество агрегатов и кристаллов асфальтена и нефтяных смол.

Результаты визиометрического анализа показали закономерность диспергирования и растворения фракций асфальтенов и нефтяных смол при повышении температуры. Массовая доля асфальтенов и нефтяных смол в твердой форме снижается при нагреве на 7,9%.

Таблица 3

**Изменение фазового состава мазута флотского Ф-5 при изменении температуры**  
**Change in the phase composition of F-5 bunker fuel oil with temperature change**

№	Температура собирателя	Массовая доля фракций, %		
		твердые парафины	твердые АСФ	низкомолекулярные компоненты с растворенными парафинами и АСФ
1	-10 °С	6,5	28,1	59,4
2	10 °С	4,6	26,4	69,0
3	14 °С	1,5	25,5	73,0
4	24 °С	нет	24,6	75,4
5	50 °С	нет	20,2	79,8

Это означает увеличение массовой доли данной фракции асфальтенов и нефтяных смол в форме коллоидного и истинного раствора (табл. 3).

Близкие результаты были получены при выборе температурных режимов подготовки собирателя, состоящего из мазута флотского Ф-5 и Маччобинской нефти. Повышение температуры от 24 до 50 °С приводит к увеличению растворимости АСФ, фиксируемому снижением массовой доли твердых АСФ с 9,2 до 4,3% (табл. 4).

Таким образом, показано, что нагрев собирателя является действенным фактором, обеспечивающим переход фракции асфальтенов и нефтяных смол в коллоидно-дисперсное и растворенное

состояние, придающее собирателю повышенную адгезионную активность и обеспечивающее его устойчивое закрепление на алмазах.

Для выбора оптимального температурного режима процессов кондиционирования алмазосодержащего материала и флотации алмазов необходимо определить условия, при которых рост извлечения алмазов не сопровождается аналогичным или большим ростом флотиремости минералов кимберлита. Для решения поставленной задачи на стадии лабораторных исследований была применена методика беспенной флотации мономинеральных проб и смесей минералов в трубке Халлимонда. Результаты флотационных опытов показали, что

**Изменение массовых долей компонентов в смеси 1:1 мазута флотского Ф-5 и нефти Маччобинской дегазированной при нагреве собирателя**  
**Change in the mass fractions of components in a 1:1 mixture of F-5 bunker fuel oil and Machobinsky degassed oil when heating a collector**

№	Температура собирателя	Массовая доля фракций, %		
		твердые парафины	твердые АСФ	низкомолекулярные компоненты с растворенными парафинами и АСФ
4	24 °С	2,5	9,2	88,3
5	32 °С	1,0	8,9	90,1
6	38 °С	нет	4,6	95,4
7	45 °С	нет	4,5	96,0
8	50 °С	нет	4,3	95,7
9	60 °С	нет	4,2	95,8
10	70 °С	нет	4,0	96,0

максимальное извлечение алмазов при пенной сепарации достигается в интервале температур нагрева собирателя от 38 °С до 50 °С (см. табл. 4). При температуре приготовления аполярного собирателя более 50 °С эффективность флотации не изменяется.

При проведении исследований также изучалась флотуемость алмазов при возрастании температуры среды в операции кондиционирования исходного питания цикла пенной сепарации с собирателем. Максимальное повышение извлечения алмазов в операции кондиционирования было достигнуто при температуре 40 °С и составило 8%. Для достижения положительного результата целесообразен дополнительный подогрев пульпы в операции кондиционирования алмазо-кимберлитового продукта перед операцией пенной сепарации. При отсутствии или высокой стоимости тепла целесообразно ограничиться подогревом непосредственно дозируемого собирателя.

Апробация модифицированных собирателей и тепловых режимов подготовки исходного алмазосодержащего продукта проводилась на установке пенной сепарации ЛФМ-001С в институте «Якутнипроалмаз». Используемый при испытаниях реагентный режим соответствовал фабричному. Расход собирателя составлял 800 г/т.

Таблица 5

**Показатели пенной сепарации при варьировании температуры пульпы при кондиционировании и пенной сепарации**  
**Key performance indicators of froth separation when varying the temperature in conditioning and froth separation process**

№	Температура, °С	Извлечение алмазов в концентрат, %	Выход кимберлита в концентрат, %	Селективность, %
1	10	74,0	1,5	69,5
2	14	78,2	1,6	73,4
3	20	79,2	1,6	74,4
4	24	79,4	1,7	74,3
5	28	80,5	4,0	68,5

Результаты испытаний показали, что при повышении температуры пульпы в операциях кондиционирования и пенной сепарации с 10–14 °С до 20–24 °С происходит увеличение извлечения алмазов в концентрат на 1,2–5,4% (табл. 5). В результате испытаний на установке пенной сепарации был рекомендован температурный режим, предполагающий нагрев собирателя до 38–50 °С, нагрев и поддержание температуры в операции кондиционирования с собирателем от 30 до 40 °С и в операции пенной сепарации от 20 до 24 °С.

Наряду с оценкой эффективности выбранных режимов в условиях, близких к промышленным, ставилась задача определения оптимальной температуры процесса пенной сепарации при использовании модифицированных собирателей.

Были проведены эксперименты с использованием в качестве собирателя мазута Ф-5, модифицированного добавками дизельной технологической фракции. Опыты ставились для оценки эффективности применения модифицированных собирателей при различных температурных режимах. Пенная сепарация проводилась в интервале температур 14–28 °С. Этот интервал отвечает температурам среды в естественных условиях (14–20 °С) и температурам среды при использовании термообработки ис-

ходного питания или подогрева перед операциями кондиционирования и пенной сепарации (24–28 °С).

Как видно из результатов, представленных в табл. 6, наименьшее извлечение алмазов наблюдается при 10 °С. При 14 °С извлечение алмазов в концентрат заметно возрастает и составило для рекомендованных собирателей 78,5–82,9%, что на 0,7–5,1% выше, чем в случае применения мазута Ф-5.

Следует отметить, что извлечение алмазов в концентрат при температуре 24 °С при использовании мазута флотского Ф-5 превышает соответствующие значения извлечения при температуре процесса флотации 14 °С на 2,1–4,5% (см. табл. 6). При дальнейшем повышении температуры в операции пенной сепарации до 28 °С роста извлечения алмазов практически не наблюдается, при этом повышается извлечение в концентрат минералов кимберлита.

Такие результаты обосновывают целесообразность поддержания оптимального теплового режима (20–24 °С) в процессе пенной сепарации (см. табл. 6). Важным результатом, полученным при анализе показателей пенной сепарации,

является факт достижения максимального извлечения алмазов при низкой температуре (10–14 °С) в опыте с использованием мазута с большей степенью разбавления (КМ-14) и максимального извлечения алмазов при повышенной температуре (24–28 °С) в опыте с использованием мазута с меньшей степенью разбавления (КМ-10). Полученные результаты дают возможность альтернативного решения задачи повышения эффективности пенной сепарации. В условиях ведения процесса при низких температурах (10–14 °С) требуемый результат может быть достигнут путем применения модифицированных собирателей с высокой степенью разбавления (КМ-14) и дополнительной подачи реагентов-диспергаторов собирателя. При применении режимов теплового кондиционирования целесообразно использовать модифицированные собиратели с меньшей степенью разбавления (КМ-10).

Полученные результаты также показали, что при пониженных температурах целесообразно применение в качестве собирателя смеси мазута Ф-5 и Маччобинской нефти. Применение такого со-

Таблица 6

**Извлечение алмазов с использованием различных собирателей при варьировании температуры пульпы при пенной сепарации**  
**Recovery of diamonds using various collectors when varying the pulp temperature during froth separation**

Собиратель	Температура							
	10 °С		14 °С		24 °С*		28 °С*	
	Извлечение в концентрат, %							
	алм.**	кимб.	алм.	кимб.	алм.	кимб.	алм.	кимб.
Мазут флотский Ф-5	72,6	0,9	77,8	1,2	82,2	1,4	82,4	1,6
КМ-10 (мазут Ф-5+10% ДТФ)	76,4	1,0	82,4	1,3	85,6	1,5	85,4	1,7
КМ-14 (мазут Ф-5+14% ДТФ)	77,8	1,1	82,9	1,3	85,0	1,5	84,8	1,7
Нефть Маччобинская	68,6	0,8	72,6	1,4	75,7	1,7	75,2	1,9
Мазут Ф-5+нефть «Маччобинская» 1:1	74,2	1,0	78,5	1,3	82,8	1,5	81,9	1,7

\* с применением подогрева оборотной воды; \*\* алм. — алмазов, кимб. — кимберлита.

бирателя более эффективно, чем использование одного мазута Ф-5 (см. табл. 6) и перспективно как альтернатива модифицированным собирателям с более дорогостоящими добавками.

Предложенные технологические режимы прошли промышленную апробацию на обогатительных фабриках АК «Алроса». Результаты проведенных испытаний подтвердили эффективность применения собирателей КМ-10 и КМ-14 в широком диапазоне температур рабочей среды в операциях пенной сепарации с возможностью повышения извлечения алмазов в концентрат на 2,0–2,9%. Промышленная апробация смеси мазута Ф-5 и Маччобинской нефти на обогатительной фабрике №14 в соотношении 1:1 также показала возможность повышения извлечения алмазов на 1,1–2,1%. Полученные результаты послужили основанием для внедрения разработанных реагентных и температурных режимов на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА».

### **Заключение и выводы**

Показано, что разбавление мазутов низко- и среднемолекулярными фракциями нефти, а также добавками маслорастворимых ПАВ в интервале от 10 до 20% приводит к изменению фазового состояния собирателя, и в первую очередь — к переводу асфальтен-смолистых фракций в растворенную форму. При этом улучшается эффективность диспергирования модифицированного собирателя в водной фазе в операции кондиционирования с реагентами и эффективность его закрепления на алмазах. При нагревании собирателя до температуры 38–50 °С также наблюдается изменение фазового состояния собирателя вследствие перехода асфальтен-смолистых фракций в растворенную форму. Улучшение активности собирателя достигается также при добавках в

водную фазу водорастворимых ПАВ с диспергирующими свойствами.

Проведенными флотационными исследованиями обоснована возможность применения способов модифицирования собирателей добавками маслорастворимых ПАВ, реагентной и тепловой обработки водно-минеральных дисперсных систем для повышения флотиремости и снижения потерь алмазов в процессе пенной сепарации. Показана возможность альтернативного выбора решения задачи повышения эффективности пенной сепарации в широком диапазоне температуры среды. В условиях ведения процесса при низких температурах (10–14 °С) требуемый результат достигается с применением модифицированных собирателей с большей степенью разбавления (КМ-14) и при дополнительной подаче реагентов-диспергаторов собирателя, в то время как при применении режимов теплового кондиционирования целесообразно использовать модифицированные собиратели с меньшей степенью разбавления (КМ-10). Результаты также показали эффективность применения в качестве собирателя при низких температурах (10–14 °С) смеси мазута Ф-5 и Маччобинской нефти.

Для повышения извлечения алмазов целесообразно проводить дополнительный подогрев пульпы в операции пенной сепарации до 20–24 °С, при кондиционировании питания пенной сепарации — до 30–40 °С или подогрев дозируемого собирателя до 38–50 °С.

Промышленная апробация модифицированных собирателей КМ-10, КМ-14 и смеси мазута Ф-5 с Маччобинской дегазированной нефтью подтвердила их эффективность в операциях пенной сепарации в широком диапазоне температур рабочей среды и показала возможность повышения извлечения алмазов в концентрат на 1,1–2,9%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Чантурия Е. Л., Тимофеев А. С. Глубокая переработка алмазосодержащего сырья природного и техногенного происхождения // Маркшейдерия и недропользование. — 2023. — № 2 (124). — С. 4–14. DOI: 10.56195/20793332\_2023\_2\_4\_14.
2. Злобин М. Н. Технология крупнозернистой флотации при обогащении алмазосодержащих руд // Горный журнал. — 2011. — № 1. — С. 87–89.
3. Чантурия В. А., Бондарь С. С., Годун К. В., Горячев Б. Е. Современное состояние алмазодобывающей отрасли России и основных алмазодобывающих стран мира // Горный журнал. — 2015. — № 2. — С. 55–58.
4. Морозов В. В., Коваленко Е. Г., Двойченкова Г. П., Чуть-Ды В. А. Выбор температурных режимов кондиционирования и флотации алмазосодержащих кимберлитов компаундными собирателями // Горные науки и технологии. — 2022. — Т. 7. — № 4. — С. 287–297.
5. Махрачев А. Ф., Ларионов Н. П., Савицкий В. Б. Новые направления в технологии обогащения алмазосодержащего сырья на предприятиях АК «АЛРОСА» // Горный журнал. — 2005. — № 7. — С. 65–68.
6. Матвеева Т. Н., Громова Н. К., Ланцова Л. Б. Перспективные реагенты для извлечения стратегических металлов из труднообогатимого минерального сырья // Записки Горного института. — 2024. — Т. 269. — С. 757–764.
7. Верхотуров М. В., Амелин С. А., Коннова Н. И. Обогащение алмазов // Международный журнал экспериментального образования. — 2012. — № 2. — С. 61.
8. Махрачев А. Ф. Повышение эффективности реагентов-собирателей для флотации алмазов на основе виброструйной магнитной активации / Труды международной конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья». — Екатеринбург, 2018. — С. 122–126.
9. Liu L., Cheng G., Yu W., Yang Ch. Flotation collector preparation and evaluation of oil shale // Oil Shale. 2018, vol. 35, no. 3, pp. 242–253. DOI: 10.3176/oil.2018.3.04.
10. Кондратьев С. А., Хамзина Т. А. Повышение качества концентрата во флотационном обогащении низкосортного угля // Записки Горного института. — 2024. — Т. 265. — С. 65–77.
11. Westhuyzen P., Bouwer W., Jakins A. Current trends in the development of new or optimization of existing diamond processing plants, with focus on beneficiation // Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014, vol. 114, pp. 537–546.
12. Nita I. Osman S., Iulian O. Dynamic viscosity dependence on temperature for fuels used for diesel engine // Ovidius University Annals of Chemistry. 2021, vol. 32, pp. 98–103. DOI: 10.2478/auoc-2021-0014.
13. Алексеенко В. В., Воронов Д. В., Каташевцев М. Д., Пахомовский А. Н. Исследование гранулометрического состава эмульсий с помощью оптического микроскопа и методом автоматизированного распознавания объектов на цифровой фотографии // Вестник ИрГТУ. — 2015. — № 2 (97). — С. 99–104.
14. Błaszczów A., Ratajczak T., Szyszka D. Flotation of hydrophobic minerals in hallimond tube // Mining Science. 2024, vol. 31, pp. 219–227. DOI: 10.37190/msc243112.
15. Morozov V. V., Kovalenko E. G., Dvoichenkova G. P., Pestryak I. V., Lezova S. P. Selection of collector composition and temperature conditions for diamond foam separation // Journal of Mining and Metallurgy. 2022, vol. 58A (1), pp. 21–28.
16. Lakhova A., Safiulina A., Islamova G., Amansaryev A., Salakhov I., Petrov S., Bashkirtseva N. Study of the Impact of nonionic additives on the composition and structure of petroleum dispersed systems by IR spectroscopy // Processes. 2021, vol. 9, article 553. DOI: 10.3390/pr9030553.
17. Ганеева Ю. М. Асфальтеновые наноагрегаты: структура, фазовые превращения, влияние на свойства нефтяных систем // Успехи химии. — 2011. — Т. 80. — № 10. — С. 1034–1050.
18. Тагиев Д. Б., Келбалиев Г. И., Сулейманов Г. З., Расулов С. Р. Кинетика растворения асфальтосмолистых веществ в ароматических растворителях // Химия и технология топлив и масел. — 2017. — № 3. — С. 33–37.
19. Шуткова С. А., Долomatov М. Ю., Телин А. Г. Необычные закономерности взаимодействия асфальтенов с апротонными растворителями // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. — 2024. — № 4. — С. 147–158. DOI: 10.31660/0445-0108-2024-4-147-158.
20. Махрачев А. Ф. Разработка реагентов-собирателей на основе модифицированных водонефтяных эмульсий для повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащего сырья. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. 25.0013. — М., 2019. — 23 с. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Chanturiya V. A., Dvoychenkova G. P., Chanturiya E. L., Timofeev A. S. Deep processing of diamond-bearing raw materials of natural and man-made origin. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2023, no. 2 (124), pp. 4–14. [In Russ]. DOI: 10.56195/20793332\_2023\_2\_4\_14.
2. Zlobin M. N. Coarse-grained flotation process in the beneficiation of diamond-bearing ores. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 1, pp. 87–89. [In Russ].
3. Chanturiya V. A., Bondar S. S., Godun K. V., Goryachev B. E. State of the art of the diamond mining industry of Russia and the world's major diamond-producing countries. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 2, pp. 55–58. [In Russ].
4. Morozov V. V., Kovalenko E. G., Dvoychenkova G. P., Chut-Dy V. A. Selection of temperature conditions for conditioning and flotation of diamond-bearing kimberlite using compound collectors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 4, pp. 287–297. [In Russ].
5. Makhachev A. F., Larionov N. P., Savitsky V. B. New trends in developing the processes of diamond-bearing resources at ALROSA's enterprises. *Gornyi Zhurnal*. 2005, no. 7, pp. 65–68. [In Russ].
6. Matveeva T. N., Gromova N. K., Lantsova L. B. Promising reagents for the extraction of strategic metals from difficult-to-enrich mineral raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 269, pp. 757–764. [In Russ].
7. Verkhoturov M. V., Amelin S. A., Konnova N. I. Diamond beneficiation. *International Journal of Experimental Education*. 2012, no. 2, pp. 61. [In Russ].
8. Makhachev A. F. Improving the performance of collecting agents in diamond flotation on the basis of vibrojet magnetic activation. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii «Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya»* [Proceedings of the international conference «Scientific Foundations and Practice of Ore and Technogenic Raw Materials Processing»], Ekaterinburg, 2018, pp. 122–126. [In Russ].
9. Liu L., Cheng G., Yu W., Yang Ch. Flotation collector preparation and evaluation of oil shale. *Oil Shale*. 2018, vol. 35, no. 3, pp. 242–253. DOI: 10.3176/oil.2018.3.04.
10. Kondratiev S. A., Khamzina T. A. Improving the quality of concentrate in the flotation beneficiation of low-grade coal. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 265, pp. 65–77. [In Russ].
11. Westhuyzen P., Bouwer W., Jakins A. Current trends in the development of new or optimization of existing diamond processing plants, with focus on beneficiation. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014, vol. 114, pp. 537–546.
12. Nita I., Osman S., Iulian O. Dynamic viscosity dependence on temperature for fuels used for diesel engine. *Ovidius University Annals of Chemistry*. 2021, vol. 32, pp. 98–103. DOI: 10.2478/auoc-2021-0014.
13. Alexeenko V. V., Voronov D. V., Katashevstev M. D., Pakhomovsky A. N. The study of emulsions grain size distribution by optical microscopy and computerized recognition in a digital photograph. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2015, no. 2 (97), pp. 99–104. [In Russ].
14. Błaszczów A., Ratajczak T., Szyszka D. Flotation of hydrophobic minerals in hallimond tube. *Mining Science*. 2024, vol. 31, pp. 219–227. DOI: 10.37190/msc243112.
15. Morozov V. V., Kovalenko E. G., Dvoichenkova G. P., Pestryak I. V., Lezova S. P. Selection of collector composition and temperature conditions for diamond foam separation. *Journal of Mining and Metallurgy*. 2022, vol. 58A (1), pp. 21–28.
16. Lakhova A., Safulina A., Islamova G., Amansaryev A., Salakhov I., Petrov S., Bashkirtseva N. Study of the Impact of nonionic additives on the composition and structure of petroleum dispersed systems by IR spectroscopy. *Processes*. 2021, vol. 9, article 553. DOI: 10.3390/pr9030553.
17. Ganeeva Yu. M. Asphaltene nanoaggregates: structure, phase transformations, influence on the properties of petroleum systems. *Russian Chemical Reviews*. 2011, vol. 80, no. 10, pp. 1034–1050. [In Russ].
18. Tagiev D. B., Kelbaliev G. I., Suleimanov G. Z., Rasulov S. R. Kinetics of dissolution of asphalt pitch sin aromatic solvents. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2017, no. 3, pp. 33–37. [In Russ].
19. Shutkova S. A., Dolomatov M. Yu., Telin A. G. Unusual patterns of interaction between asphaltenes and aprotic solvents. *Oil and Gas Studies*. 2024, no. 4, pp. 147–158. [In Russ]. DOI: 10.31660/0445-0108-2024-4-147-158.
20. Makhachev A. F. *Razrabotka reagentov-sobirateley na osnove modifitsirovannykh vodonefnyanykh emul'siy dlya povysheniya effektivnosti pennoy separatsii almazosoderzhashchego syr'ya* [Development of collecting agents based on modified water-oil emulsions to improve the performance of froth separation of diamond-bearing raw materials], Candidate's thesis, Moscow, 2019, 23 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Коваленко Евгений Геннадьевич*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, главный инженер, e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru, e-mail: kovalenkoeg@gmail.ru, Scopus Author ID: 57200340844,  
*Морозов Валерий Валентинович* — д-р техн. наук, профессор, НИТУ МИСИС, e-mail dchmggu@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4105-944X, Scopus Author ID: 7402759618,  
*Двойченкова Галина Петровна*<sup>2</sup> — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник; профессор, Мирнинский Политехнический институт — филиал Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, e-mail dvoigr@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-3637-7929, Scopus Author ID: 8837172700,  
*Бабушкина Алена Леонидовна*<sup>1</sup> — заведующий сектором, e-mail: babushkinaal@alrosa.ru, Scopus Author ID: 58790569100,  
*Чуть-Ды Валентина Анатольевна*<sup>1,2</sup> — ведущий инженер-технолог, аспирант ИПКОН РАН, Scopus Author ID: 58037854600, e-mail: Verhoturova-vale@mail.ru,  
<sup>1</sup> Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),  
<sup>2</sup> Институт проблем комплексного освоения недр РАН (ИПКОН РАН).  
**Для контактов:** Коваленко Е. Г., e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru, Морозов В. В., e-mail: dchmggu@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*E.G. Kovalenko*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Chief Engineer, e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru, e-mail: kovalenkoeg@gmail.ru, Scopus Author ID: 57200340844,  
*V.V. Morozov*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail dchmggu@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4105-944X, Scopus Author ID: 7402759618,  
*G.P. Dvoichenkova*<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher; Professor, Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, e-mail: dvoigr@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-3637-7929, Scopus Author ID: 8837172700,  
*A.L. Babushkina*<sup>1</sup>, Head of Sector, e-mail: babushkinaal@alrosa.ru, Scopus Author ID: 58790569100,  
*V.A. Chut-Dy*<sup>1,2</sup>, Leading Process Engineer; Graduate Student, e-mail Verhoturova-vale@mail.ru, Scopus Author ID: 58037854600,  
<sup>1</sup> Yakutnioproalmaz Institute, JSC ALROSA (PJSC), Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia,  
<sup>2</sup> Institute of Problems of Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.  
**Corresponding author:** E.G. Kovalenko, e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru, V.V. Morozov, e-mail: dchmggu@mail.ru.

Получена редакцией 27.12.2025; получена после рецензии 28.01.2026; принята к печати 10.03.2026.  
Received by the editors 27.12.2025; received after the review 28.01.2026; accepted for printing 10.03.2026.