

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМА ПЕННОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ГИПЕРГЕННО ИЗМЕНЕННЫХ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩИХ КИМБЕРЛИТОВ

В.В. Морозов<sup>1</sup>, Е.Г. Коваленко<sup>2</sup>, Г.П. Двойченкова<sup>3,4</sup>, В.В. Поливанская<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА», Мирный, Россия

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

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

**Аннотация:** Эффективным направлением снижения потерь мелких алмазов из кимберлитовых месторождений является совершенствование режима пенной сепарации и, в частности, выбор температурного и реагентного режимов основных технологических операций. Важным условием эффективности разрабатываемой технологии является учет состава водной фазы, которой существенно усложняется в условиях замкнутого водооборота. С использованием термодинамических расчетов и физико-химических исследований определены причины снижения эффективности процесса пенной сепарации в условиях водооборота, заключающиеся в гидрофилизации поверхности алмазов кристаллизующимися карбонатными и силикатными минеральными пленками и последующего закрепления на них тонких шламовых классов, а также снижении интенсивности действия применяемых реагентов в водной фазе с высокой минерализацией. Результаты термодинамического моделирования определены условия разрушения гидрофилизирующих покрытий и восстановления природной гидрофобности алмазов. Выбран температурный режим операций тепловой обработки, кондиционирования рудного питания с собирателем и непосредственно процесса пенной сепарации, обеспечивающий максимальное извлечение алмазов в концентрат при высокой селективности процесса. Предложено применять компаундные собиратели на основе мазута Ф-5 и дизельной технической фракции, сохраняющие свои характеристики в сильно минерализованных средах. Предложено использовать неосаждаемые ионами кальция реагенты-диспергаторы шламовых классов породных и кимберлитовых минералов. Разработанный режим прошел апробацию на полупромышленной автоматизированной установке пенной сепарации, где показал возможность снижения потерь алмазов на 9,8–10,7%.

**Ключевые слова:** алмазы, пенная сепарация, гидрофильность, олеофильность, кондиционирование, замкнутый водооборот, компаундные собиратели, депрессоры.

**Для цитирования:** Морозов В. В., Коваленко Е. Г., Двойченкова Г. П., Поливанская В. В. Совершенствование режима пенной сепарации при обогащении гипергенно измененных алмазосодержащих кимберлитов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 5–19. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_1\_0\_5.

---

## Improvement of frother separation mode in processing of supergene alteration-worn diamond-bearing kimberlite

V.V. Morozov<sup>1</sup>, E.G. Kovalenko<sup>2</sup>, G.P. Dvoichenkova<sup>3,4</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 of the ALROSA JSC, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Russia

<sup>3</sup> Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources  
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Mirny Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University, Mirny, Russia

---

**Abstract:** An efficient trend of reduction in loss of fine diamonds extracted from kimberlite is improvement of frother separation mode, in particular, selection of temperature and reagent mode for main process flows. An important factor of this technology efficiency is the water phase composition, which is critical in the conditions of closed water circulation. The thermodynamic calculations and physicochemical research determined the causes of the decrease in the frother separation efficiency with water circulation, namely, hydrophilization of diamond surfaces by carbonate and silica films and subsequent attachment of slime fines to them, as well as the decreased intensity of reagents in water phase in case of its high mineralization. The thermodynamic modeling defined conditions of disintegration of hydrophilic films and recovery of natural hydrophobic behavior of diamonds. The temperature mode is selected for thermal treatment, conditioning of ore feedstock with a collector and the frother separation itself, which ensures maximal recovery of diamonds in concentrate at high selectivity of the process. It is proposed to use compound collectors with black oil fuel F-5 and diesel technology fraction which preserve their properties in heavily mineralized media. Moreover, it is suggested to use dispersants of barren rocks and kimberlite slimes which are unprecipitable by calcium ions. The developed mode was tested on a pilot automated plant of frother separation and demonstrated the decrease in the loss of diamonds by 9.8–10.7%.

**Key words:** diamonds, frother separation, hydrophilic behavior, oil receptivity, conditioning, closed water circulation, compound collectors, depressants.

**For citation:** Morozov V. V., Kovalenko E. G., Dvoichenkova G. P., Polivanskaya V. V. Improvement of frother separation mode in processing of supergene alteration-worn diamond-bearing kimberlite. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1):5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_1\_0\_5.

---

### Введение

Наиболее эффективным методом извлечения из кимберлитов мелких классов алмазов является пенная сепарация [1, 2]. Уровень извлечения алмазов в цикле пенной сепарации составляет 75–90%, однако он существенно снижается при вовлечении в переработку гипергенно измененных кимберлитов, в которых имеет место существенное зарастание и снижение флотуруемости алмазов [3, 4].

Другими причинами потерь алмазов является неоптимальный состав используемых в качестве собирателей нефтепродуктов, сезонное варьирование температуры и снижение эффективности реагентов — депрессоров минералов кимберлита в условиях существенно возрастающей в условиях применения замкнутого водооборота минерализации водной фазы. В условиях применения замкнутого водооборота в водной фазе

происходит накапливание различных растворимых солей и шламов, в значительной мере влияющих на процесс флотации за счет гидрофилизации поверхности алмазов [5].

Необходимый для эффективной флотации уровень закрепления собирателя на поверхности алмазов требует применения технологий и режимов восстановления их природной гидрофобности [6]. Поставленная задача может быть достигнута при поддержании оптимального температурного режима, в т.ч. получаемого за счет использования тепла, расходуемого на стадии тепловой обработки исходного питания, обеспечивающего нагрев среды в операциях реагентного кондиционирования исходного питания и непосредственно в процессе пенной сепарации [7]. Другим условием повышения эффективности пенной сепарации является корректировка фракционного состава собирателей, обеспечивающая необходимую интенсивность закрепления собирателя на алмазах без закрепления на минералах кимберлита.

Задачей исследования является выбор наилучшего температурного и реагентного режима пенной сепарации, обеспечивающего очистку поверхности гидрофилизированных алмазов и интенсивное закрепление собирателя, не теряющего своих качеств в сильно минерализованной водной фазе [8]. Для определения путей восстановления флотиремости алмазов и выбора оптимальных режимов взаимодействия собирателей целесообразно использовать совокупность специальных методик исследований, включая измерение состава поверхности, краевого угла смачивания, гидрофобности и флотации минералов [9, 10].

#### **Методика эксперимента**

Исследование состава поверхности алмазов проводили с использованием метода электронно-зондового рентгено-

спектрального анализа (ЭЗРСА) с энергодисперсионной приставкой. Метод ЭЗРСА был реализован с использованием электронного микроскопа Jeol-5610 LV [11]. Анализ минерального состава отдельных образований и обобщенных данных на анализируемых участках поверхности алмазов проводился по данным сканирующего рентгеноспектрального анализа с использованием математических методов обработки результатов и проверялся методом ИК-Фурье спектрофотометра «Bruker» [12]. Оценку гидрофобности алмазов и собирательной способности исследуемых собирателей и эффективности реагентов-депрессоров проводили с использованием прибора для измерения краевого угла смачивания ОСА 15ЕС и установки беспенной флотации [13, 14].

Применялась усовершенствованная методика измерения краевых углов смачивания аполярным собирателем, закрепившимся в виде капли на поверхности алмазов в водной среде в условиях гидродинамических нагрузок.

Полупромышленные тесты предложенных температурных и реагентных режимов проводились на укрупненной автоматизированной установке пенной сепарации ЛФМ-001С института «Якутнипроалмаз». При проведении испытаний установка пенной сепарации работала в режиме замкнутого водооборота с использованием реагентных режимов, максимально приближенных к промышленным.

#### **Результаты исследований и их обсуждение. Исследование влияния тепловой обработки на состав поверхности и закрепление собирателя на поверхности алмазов**

Оценка состава поверхностных образований на алмазах трубки «Интернациональная» была проведена с примене-

Таблица 1

**Основные технологические характеристики минеральных групп, заложенные в модель при типизации минеральных образований на алмазах**  
**The main technological characteristics of mineral groups incorporated into the model for the typing of mineral formations on diamonds**

№	Минеральная группа	Генезис	Форма присутствия на алмазах	Склонность к адгезии на алмазах	Удаление образований с алмазов	Склонность к кристаллизации на алмазах
1	карбонаты	гипергенный	РПО, пленки	средняя	термическое	высокая
2	алюмосиликаты и силикаты	первичный, гипергенный	пленки, шламы	высокая	термическое, механическое	средняя
3	минеральные соли	первичные и гипергенные	поровый материал	низкая	термическое	средняя
4	оливины и пироксены	первичный	РПО и шламы	средняя	механическое	нет
5	оксиды и сульфиды железа	первичный и гипергенный	РПО и шламы	средняя	механическое	низкая

РПО — рельефные поверхностные образования.

нием методики типизации по основным минеральным группам. Технологические характеристики минеральных групп, представленные в табл. 1, с одной стороны, позволяют учесть генезис покрытий, приводящих к гидрофилизации алмазов, с другой, — определить рациональные технологии восстановления природной гидрофобности алмазов и способов предотвращения повторной гидрофилизации.

Группа карбонатных минералов характеризуется наибольшей склонностью к кристаллизации в пересыщенных растворах. Закрепление алюмосиликатов протекает преимущественно по механизму адгезии на поверхности алмазов (слоистые алюмосиликаты) [15]. Группа оливинов и пироксенов в меньшей степени склонна к налипанию на поверхность алмазов. Группа солеобразных хлоридных минералов характерна для кимберлитов с предельно высокой концентрацией солей в поровой жидкости, в то время как группа оксидов и сульфидов железа характерна для алмазов из существенно измененных кимберлитов [16].

Системный анализ минерального состава отдельных образований и обобщенных данных на поверхности алмазов проводился по данным сканирующего рентгеноспектрального анализа с использованием адаптированного для конкретных условий метода определенности Парето [17].

Данный метод позволяет характеризовать пробу как совокупность 5-ти минеральных групп с характерными параметрами. Расчет принадлежности пробы производится по шести значимым параметрам руды.

Разработанная методика была применена для расшифровки карт состава поверхности алмазов, полученных на электронном микроскопе с применением метода растровой рентгеноэлектронной спектроскопии (см. рис. 1).

Обобщение результатов расчетов для 100 спектров отдельных образований на поверхности 20 гидрофильных алмазов трубки «Интернациональная» показало, что преобладающей минеральной формой на исследованных гидрофильных алмазах являются карбонаты, алюмо-

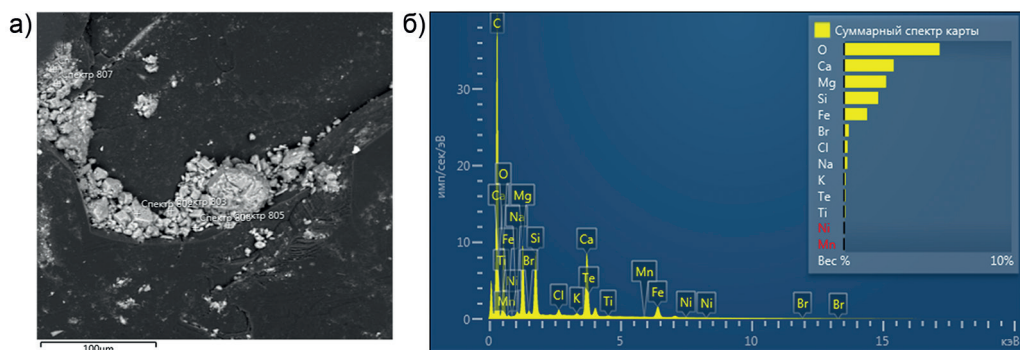


Рис. 1. Изображение (а) и интегральный спектр (б) поверхности гидрофильного алмаза трубки «Интернациональная»

Fig. 1. Image (a) and integral spectrum (b) of the surface of the hydrophilic diamond tube «International»

Таблица 2

**Характеристики варьирования параметров группового минерального состава покрытий на исследованных алмазах трубки «Интернациональная»**  
**Characteristics of variation of the parameters of the group mineral composition of coatings on the investigated diamonds of the «International» tube**

Элемент	Массовая доля минеральной группы, %		
	минимальная	максимальная	средняя
Карбонаты	3,4	86,6	31,4
Силикаты и алюмосиликаты	3,6	87,4	33,2
Минеральные соли	0,4	63,3	3,7
Оливины и пироксены	2,2	82,1	27,3
Гидроксиды и сульфиды железа	0,1	63,9	4,4

силикаты и минералы группы оливина (31,3; 33,2 и 27,3%) (табл. 2).

Анализ ИК-спектров алмазов трубки «Интернациональная» подтвердил данные расчетов и показал, что на их поверхности наиболее распространены карбонатные и алюмосиликатные минералы.

Анализ толщины выявленных минеральных покрытий показал наличие на поверхности алмаза как рельефных образований с высотой до 20 мкм, так и пленок с толщиной менее 0,1 мкм. Пленки состоят на 90% из карбоната и метасиликата кальция.

Для определения возможности протекания техногенной гидрофилизации и, одновременно, выбора условий удаления гидрофилизирующих покрытий

было проведено термодинамическое моделирование устойчивости карбонатных и силикатных солей кальция и магния, оценена возможность их разрушения. При расчете диаграмм термодинамической стабильности гидрофилизирующих минералов в водной среде применялась интегральная форма уравнения изобары химической реакции [18]. При расчетах использовалась температура 25 и 83 °С, что соответствовало стандартным условиям и рекомендуемому режиму (80–86 °С) тепловой обработки питания пенной сепарации.

Анализ результатов измерений показал, что оборотная вода и жидкая фаза пульпы цикла пенной сепарации насыщена хлоридными, сульфатными солями

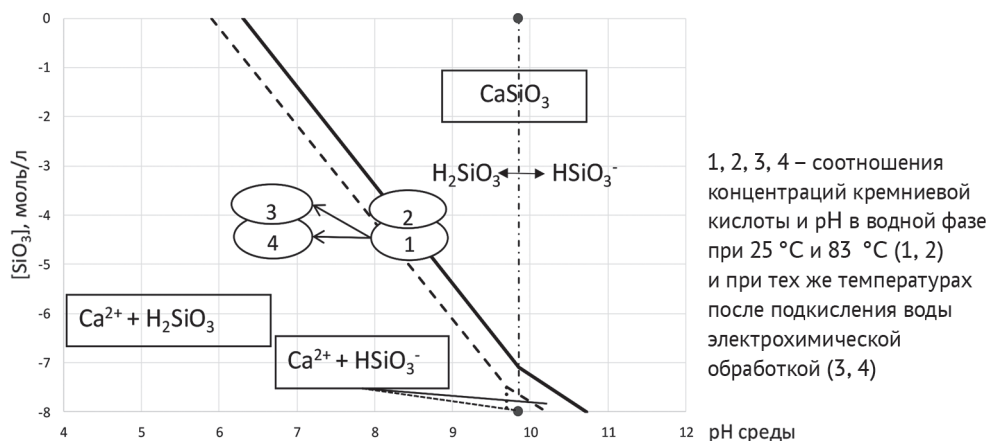


Рис. 2. Диаграмма термодинамической устойчивости метасиликата кальция в водной среде при температуре 25 °C (сплошные линии) и 83 °C (пунктирные линии)

Fig. 2. Diagram of thermodynamic stability of calcium metasilicate in an aqueous medium at a temperature of 25 °C (solid lines) and 83 °C (dotted lines)

натрия, калия, кальция и магния (суммарная концентрация до 24 г/л), что в условиях непрерывной абсорбции водной фазы углекислым газом и обуславливает возможность образования карбоната кальция и тригидрогидрокарбоната магния в операциях классификации, реагентного кондиционирования и пенной сепарации. Такой вывод обоснован соотношением параметров водной фазы, отвечающим области устойчивости карбонатных минералов [19]. Предотвращение образования осадка, или его растворение, может быть достигнуто смещением pH в кислую область за счет добавок кислоты или электрохимической обработки водной фазы.

Анализ поверхности гидрофильных алмазов показывает значительное распространение силикатных и алюмосиликатных минералов как в виде рельефных, так и в виде пленочных образований. Закономерности гидрофиллизации поверхности минералов силикатными соединениями до настоящего времени не были достаточно изучены. Источником силикатных ионов в водной фазе пульпы являются растворимые силикаты, приносимые с оборотной водой, а также

ионы и молекулы кремниевых кислот, образующиеся из тонко диспергированных классов кварца, образующихся в процессах рудоподготовки [20, 21].

Результаты расчетов, представленные в виде диаграмм термодинамической стабильности соединений кальция и кремниевой кислоты, показывают, что в водных растворах метасиликат кальция (наиболее устойчивый относительно других силикатов кальция и магния) термодинамически устойчив в нейтральной и слабощелочной среде (рис. 2).

В слабокислой среде протекает гидролиз минерала с образованием метакремниевой кислоты и иона кальция. Результаты проверки состава осадков, образующихся при смещении pH среды в щелочную область, проведенные методом ИК-спектроскопии, показали, что при взаимодействии силиката натрия и хлорида кальция при pH среды выше 8,05 происходит образование обводненной формы метасиликата кальция, что отчетливо подтверждается появлением полосы поглощения при  $\nu = 1030 \text{ см}^{-1}$ , соответствующей колебаниям связей группировок Si-O и силоксановых мостиков Si-O-Si и деформационным коле-

баниями связей Н-О-Н молекул кристаллизационной воды ( $\nu = 1634 - 1640 \text{ см}^{-1}$ ).

При повышенной температуре ( $83 \text{ }^\circ\text{C}$ ) вероятно уменьшение растворимости метасиликата кальция и увеличение вероятности кристаллизации минерала на поверхности алмаза (область 2 на рис. 2). Необходимым условием снижения вероятности кристаллизации силиката кальция на поверхности алмазов является смещение рН среды в нейтрально-слабокислую область с рН менее 7,5 (области 3, 4 на рис. 2).

Анализ данных ИК-спектрофотометрии показывает, что при смещении рН в нейтральную область ( $\text{pH} = 7$ ) метасиликат кальция разлагается, и кремниевые соединения оказываются представленными преимущественно золев кремнезема. Аналогичная картина наблюдается и при температуре  $83 \text{ }^\circ\text{C}$ . Полученные результаты показывают возможность удаления не только карбонатных, но и силикатных пленок с поверхности алмаза при тепловой обработке в слабокислой среде ( $\text{pH}$  менее 7).

Экспериментальные исследования термохимической очистки алмазов от минеральных покрытий проводились на природных гидрофильных алмазах трубки «Интернациональная». Алмазы обрабатывались при температуре  $40 - 90 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение заданного времени (1 мин) в водной среде, соответствующей по составу оборотной воде цикла пенной сепарации на обогатительной фабрике № 3. После обработки проводился анализ элементного состава поверхности алмазов на сканирующем электронном микроскопе JEOL JIB-Z4500 с приставкой для энергодисперсионного анализа.

Результаты измерений показывают, что повышение температуры приводит к очистке поверхности алмазов. Эффект очистки в отношении карбонатных минералов начинает заметно проявляться, начиная с температуры  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Согласно

результатам ранних исследований [22] эффект очистки при относительно небольшом повышении температуры ( $40 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) связан с термомеханическим механизмом, обусловленным существенно различным коэффициентом расширения алмазов и минералов кимберлита. Максимальный эффект очистки, отождествляемый с удалением более 75% гидрофильных покрытий, состоящих как из карбонатных, так и силикатных и алюмосиликатных минералов, достигается при проведении тепловой обработки в интервале температур  $65 - 90 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 3). В данном интервале температур реализуется как эффект термомеханической, так и термохимической очистки [22]. Анализ результатов исследований позволяет рекомендовать интервал температур от  $65$  до  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  как наиболее рациональный с позиции достижения наиболее полной очистки поверхности алмазов.

Отсутствие необходимости в поддержании сильноокислых сред при тепловой

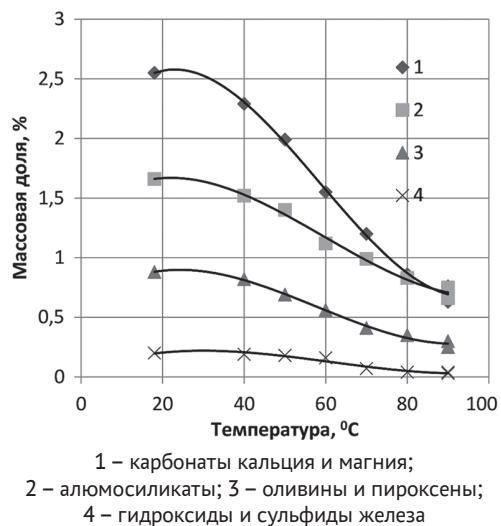


Рис. 3. Зависимости массовых поверхностных концентраций основных минеральных примесей на поверхности гидрофильных алмазов от температуры обработки

Fig. 3. Dependences of the mass surface concentrations of the main mineral impurities on the surface of hydrophilic diamonds on the processing temperature

обработке делает возможным и целесообразным применение для регулирования параметров оборотной воды технологии бездиафрагменной электрохимической обработки, позволяющей снизить рН до 5,7–6,5, уменьшить концентрацию ионов кальция и карбоната в 1,5–5 раз [8] и, соответственно, уменьшить вероятность кристаллизации как карбонатных, так и силикатных пленок на поверхности алмазов.

### Результаты исследований и их обсуждение. Выбор температурного и реагентного режима кондиционирования и пенной сепарации мелких классов алмазов

Условием эффективности процесса пенной сепарации является повышение адгезионной активности собирателя на основе поддержания наилучшего его фазового состава и регулирования температуры среды.

Анализ влияния температуры на структуру мазута Ф-5 показал, что в условиях

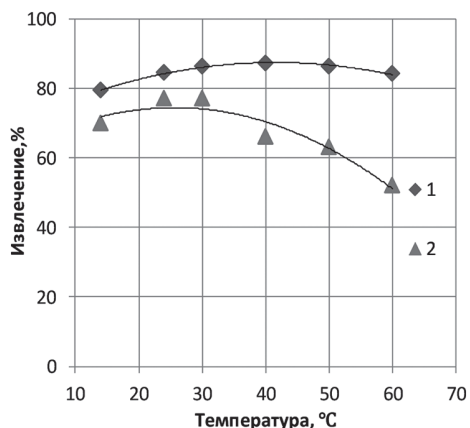


Рис. 4. Изменение извлечений алмаза (1) и кимберлита (2), умноженное на 10 при изменении температуры в операции кондиционирования питания пенной сепарации с собирателем

Fig. 4. Change in diamond (1) and kimberlite (2) extractions multiplied by 10 when the temperature changes in the operation of conditioning the supply of foam separation with the collector

хранения при отрицательных температурах в нем выкристаллизуются фазы смол и асфальтенов, парафинов, и формируются капли низкомолекулярных фракций. При нагревании мазута флотского до 24 °С оптически различаемые образования парафинов практически исчезают, количество смол и асфальтенов в твердом состоянии сокращается в 2–2,5 раза. При дальнейшем нагреве (до 50 °С) уменьшается практически до нуля количество смол и асфальтенов в твердом состоянии. Перевод смол и асфальтенов в форму коллоидного раствора в низко- и среднемoleкулярных фракциях мазута повышает его адгезионную активность в отношении поверхности алмаза. Так, ранее проведенными исследованиями было показано [7], что краевой угол смачивания, характеризующий олеофильность алмаза и склонность к его взаимодействию с собирателем плавно увеличивается в интервале температур 14–40 °С.

Результаты исследований на смеси алмазов и минералов кимберлита, проведенных на установке беспенной флотации, показали увеличение флотиремости алмазов при возрастании температуры водной среды в операции кондиционирования с собирателем до 30–40 °С (рис. 4).

Фракции кимберлита увеличивают флотиремость при повышении температуры в операции кондиционирования до 30 °С и снижают флотиремость с повышением температуры более 30 °С (рис. 4). Анализ полученных результатов дает основания предположить, что оптимальный температурный режим операции кондиционирования с собирателем предполагает поддержание температуры среды в операции кондиционирования в пределах 30–50 °С, когда достигается максимальная флотиремость алмазов и снижается флотиремость минералов кимберлита.



Существенной причиной ухудшения флотуемости алмазов в условиях замкнутого водооборота является рост минерализации водной фазы. Повышение ионной силы раствора ведет к гидратации минеральной поверхности за счет концентрирования на межфазной границе поверхностно активных ионов и молекул. С другой стороны, повышение концентрации электролита ведет к уменьшению толщины диффузной части двойного электрического слоя (ДЭС), что способствует уменьшению расклинивающего давления и, как следствие, снижению кинетической устойчивости дисперсных систем [23]. На практике это проявляется в виде фактора как увеличивающего, так и снижающего флотуемость минералов аполярными собирателями [24, 25].

Для определения характера влияния концентрации электролита на гидрофобность алмазов были поставлены эксперименты по измерению краевого угла смачивания на трехфазной границе алмаз — водная фаза — аполярный собиратель. Была применена методика, включающая операцию смачивания поверхности кристалла алмаза водной фазой, нанесения на смоченную поверхность

капли собирателя, подъема уровня жидкости в кювете, сопровождающегося всплыванием части капли под действием архимедовой силы и формирование трехфазного периметра смачивания в режиме гидродинамической турбулентности.

Измерения краевых углов смачивания проводили для мазута Ф-5 и его компаундов с дизельной технической фракцией (ДФТ). Измерения проводились на модельном растворе, имитирующем оборотную воду цикла пенной сепарации с весовым соотношением растворенных солей  $\text{CaCl}_2 : \text{MgCl}_2 : \text{NaCl}$  как 1 : 0,2 : 0,8 при температуре 24 °С.

Полученные результаты помогли установить экстремальный характер зависимости «краевой угол — минерализация» для исследованных собирателей. Характерно, что для компаундов мазута Ф-5 с дизельной технической фракцией КМ-10 (мазут Ф-5 + 10% ДТФ) и КМ-14 (мазут Ф-5 + 14% ДТФ) были получены большие относительные значения краевого угла смачивания (рис. 5), и при этом максимальное значение величины краевого угла наблюдалось в более минерализованной водной фазе, что предполагает лучшую применимость компа-

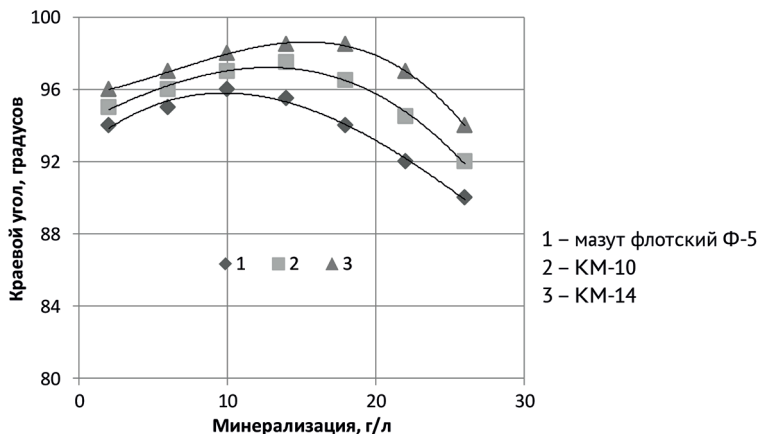


Рис. 5. Зависимости величины трехфазного краевого угла смачивания капли собирателя на алмазе в оборотной воде от минерализации водной фазы

Fig. 5. Dependences of the value of the three-phase marginal wetting angle of a collector drop on a diamond in recycled water on the mineralization of the aqueous phase

Таблица 3

**Извлечение алмазов и кимберлита в концентрат при пенной сепарации с использованием различных собирателей и при варьировании температуры пульпы**  
**Extraction of diamonds and kimberlite into concentrate by foam separation using different collectors and with varying pulp temperature**

Температура, °С	14 °С		24 °С		28 °С	
Собиратель	извлечение, %					
	алмазов	кимберлита	алмазов	кимберлита	алмазов	кимберлита
Мазут флотский Ф-5	77,8	1,2	82,2	1,4	82,4	1,6
КМ-10	82,4	1,2	85,6	1,5	85,4	1,7
КМ-14	82,9	1,3	85,0	1,5	84,8	1,7

удных собирателей в сильноминерализованных средах.

Дальнейшие исследования ставили задачей оценить эффективность пенной сепарации при повышении температуры среды. Опыты по пенной сепарации проводились при и температуре 14–28 °С. Результаты экспериментов показали, что наибольшее извлечение алмазов в концентрат достигается при температуре процесса 24 °С с использованием компаундных собирателей КМ-10 и КМ-14 (табл. 3).

Исследование применения реагентов для интенсификации обесшламливания алмазов и снижения флотуемости природно-гидрофобных минералов кимберлита показало эффективность использования полифосфата натрия, оксиэтилидендифосфоновой кислоты (ОЭДФ), а также метасиликата натрия [8]. В условиях применения замкнутого водооборота и возрастания минерализации водной фазы до 18 г/л наилучшие технологические результаты (извлечение алмазов 94,3%) достигаются при одновременном применении в процессе обесшламливания ультразвуковой оттирки и добавок в оборотную воду оксиэтилидендифосфоновой кислоты при концентрации 500 мг/л. Данный реагент был применен при апробации выбранных режимов на полупромышленной установке.

Полупромышленные тесты режимов подготовки исходного алмазосодержащего продукта и реагентных режимов

проводились на укрупненной установке пенной сепарации ЛФМ-001С института «Якутнипроалмаз». Установка работала в режиме замкнутого водооборота. При работе установки автоматически поддерживался заданный расход воздуха и уровень пульпы во флотационной камере. Используемый при пенной сепарации реагентный режим соответствовал фабричному. В процессе кондиционирования использовался собиратель КМ-10 при расходе 800 г/т.

При проведении укрупненных опытов проводили предварительную обработку исходной пробы при температуре 83–85 °С. Затем пробу разбавляли оборотной водой и проводили кондиционирование пробы с собирателем в течение 2 мин при температуре 26–37 °С. Подготовленная проба алмазосодержащего материала подавалась на пенный слой сепаратора, где поддерживалась температура 21–25 °С. Сфлотированные минералы удалялись в приемник пенного продукта, где их обезвоживали на сите. Избыточная водная фаза камерного продукта возвращалась в расходный бак оборотной воды. Отделенная от твердой фазы пенного продукта водная фаза также возвращалась в бак оборотной воды. Из продуктов пенной сепарации после их подсушивания извлекались алмазы для взвешивания и расчета извлечения.

Результаты экспериментов показали возможность поддержания оптимально-

Таблица 4

**Параметры теплового режима и показатели процесса пенной сепарации при использовании тепловой обработки исходного питания – алмазосодержащего продукта**

**Parameters of the thermal regime and indicators of the foam separation process when using heat treatment of the initial feed – a diamond-containing product**

№	Температура, °С			Извлечение алмазов в концентрат, %	Выход кимберлита в концентрат, %
	при обработке исходного питания	при кондиционировании питания с собирателем	в операции пенной сепарации		
1	18 (без обработки)	18	18	77,5	1,33
2	60	26	21,3	81,4	1,34
3	80	32,5	22,5	84,5	1,45
4	85	35	24	87,3	1,50
5	90	37	25	88,2	1,48

го теплового режима в операциях кондиционирования питания с собирателем и непосредственно в процессе пенной сепарации (табл. 4).

Требуемый температурный режим достигается при применении технологии паровой обработки питания цикла пенной сепарации, апробированной ранее на обогатительной фабрике № 3 Мирнинского ГОКа. Поддерживания выбранных температурных режимов основных операций обеспечивается за счет тепла, расходуемого при тепловой обработке исходного питания. В процессе обработки паром исходного питания при 80–90 °С температура в операции кондиционирования с реагентами составляет 26–35 °С, в пенной сепарации – 21–23 °С.

Анализ полученных результатов показал, что в выбранном тепловом режиме достигается существенное увеличение извлечения алмазов (до 9,8–10,7%).

### Выводы

Установлены причины снижения эффективности процесса пенной сепарации в условиях водооборота, заключающиеся в гидрофилизации поверхности алмазов карбонатными и силикатными минеральными образованиями и закреп-

пившимися на них примазками тонких шламовых классов, а также снижении интенсивности закрепления применяемых собирателей в водной фазе с высокой минерализацией.

Выбран температурный режим операций тепловой обработки, кондиционирования рудного питания с собирателем и непосредственно процесса пенной сепарации, обеспечивающий эффективное извлечение алмазов за счет восстановления природной гидрофобности поверхности алмазов и повышения интенсивности закрепления на ней собирателя.

Обосновано применение компаундных собирателей на основе мазутов с добавками среднемолекулярных нефтяных дистиллятов, обеспечивающих необходимую адгезионную активность применяемого собирателя по отношению к флотируемому алмазам в сильноминерализованной воде. Разработанный режим пенной сепарации обеспечивает повышение извлечения алмазов в концентрат при сохранении необходимой селективности процесса. При проведении процесса пенной сепарации в выбранном тепловом режиме в случае использования собирателя КМ-10 достигается увеличение извлечения алмазов на 9,8–10,7%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верхотуров М. В., Амелин С. А., Коннова Н. И.* Обогащение алмазов // Международный журнал экспериментального образования. — 2012. — № 2. — С. 61.
2. *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.
3. *Злобин М. Н.* Технология крупнозернистой флотации при обогащении алмазосодержащих руд // Горный журнал. — 2011. — № 1. — С. 87–89.
4. *Zhang J., Kuznetsov D., Yub M.* Improving the separation of diamond from vein minerals // Minerals Engineering. 2012, vol. 36-38, no. 6, pp. 168–171. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.03.015 168171.
5. *Морозов В. В., Двойченкова Г. П., Коваленко Е. Г., Тимофеев А. С.* Обоснование степени замыкания водооборота в цикле пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12. — С. 5–19. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_12\_0\_5.
6. *Верхотурова В. А., Елшин И. В., Немаров А. А., Толстой М. Ю., Островская Г. Х.* 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.
7. *Морозов В. В., Коваленко Е. Г., Двойченкова Г. П., Чуть-Ды В. А.* Выбор температурных режимов кондиционирования и флотации алмазосодержащих кимберлитов компаундными собирателями // Горные науки и технологии. — 2022. — Т. 7. — № 4. — С. 287–297. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-10-23.
8. *Двойченкова Г. П., Коваленко Е. Г., Тимофеев А. С., Подкаменный Ю. А.* Повышение эффективности пенной сепарации алмазосодержащего материала за счет комбинированной очистки поверхности алмазов от шламовых гидрофилизирующих покрытий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 10. — С. 20–38. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_10\_0\_20.
9. *Pestryak I. V.* Modeling and analysis of physicochemical processes in recirculating water conditioning // Journal of Mining Science. 2015, vol. 51, no. 4, pp. 811–818. DOI: 10.1134/S1062739115040189.
10. *Vilasó-Cadre J., Nolasco-Cuenca M., Ávila-Márquez D., Arada-Pérez A., Gutiérrez-Castañeda E., Reyes-Domínguez I., Blanco-Flores A.* Evaluation of the statistical reliability of microflotation experiments using a hallimond flotation cell // Canadian Metallurgical Quarterly. 2022. DOI: 10.1080/00084433.2022.2160899.
11. *Mahoney J., Monroe C., Swartley A. M.* Surface analysis using X-ray photoelectron spectroscopy // Spectroscopy Letters. 2020, vol. 53, no. 10, pp. 726–736. DOI: 10.1080/00387010.2020.1824197.
12. *El-Azazy M., El-Shafie A. S., Al-Saad K.* Introductory chapter / Infrared Spectroscopy – Principles and Applications, 2023, 220 p. DOI: 10.5772/intechopen.109139.
13. *Huhtamaki T., Tian X., Korhonen Y., Robin R.* Determination of the wetting characteristics of the surface by measuring the wetting angle // Nature Protocols. 2018, vol. 13, pp. 1521–1538. DOI: 10.1038/s41596-018-0047-0.
14. *Батушкин А. Н., Байченко А. А.* Оценка собирательных свойств аполярных реагентов в аппарате беспенной флотации // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2005. — № 6(51). — С. 73–75.
15. *Аликина Ю. А., Калашникова Т. А., Голубева О. Ю.* Сорбционная способность алюмосиликатов группы каолинита различной морфологии // Физика и химия стекла. — 2021. — Т. 47. — № 1. — С. 56–64.
16. *Зинчук Н. Н.* Об особенностях исследований постмагматических и гипергенных изменений кимберлитовых пород // Отечественная геология. — 2021. — № 5. — С. 26–42. DOI: 10.47765/0869-7175-2021-10026.

17. Hero A. O., Fleury G. Pareto-optimal methods of gene ranking: Genomic signal processing // *Journal of VLSI Signal Processing*. 2004, vol. 38, no. 3, pp. 259–275. DOI: 10.1023/B:VLSI.0000042491.03225.cf.
18. Engel T., Reid P. Physical chemistry: Thermodynamics, statistical thermodynamics, and kinetics. 2020, 682 p.
19. Voigt M., Marieni C., Clark D., Gislason S., Oelkers E. Evaluation and refinement of thermodynamic databases for mineral carbonation // *Energy Procedia*. 2018, vol. 146, pp. 81–91. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.012.
20. Lunevich L. Aqueous silica and silica polymerisation / Desalination – Challenges and Opportunities. 2019. DOI: 10.5772/intechopen.84824.
21. Baltakis K., Yauberti R., Siautsiunas R., Kaminskas R. The effect of SiO<sub>2</sub> modification on the formation of calcium silicate hydrate // *Materials Science-Poland*. 2007, vol. 25, no. 3, pp. 663–670.
22. 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.
23. Дерягин Б. В., Чураев Н. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. – М.: Наука, 1985. – 398 с.
24. Ткач Н. С., Амёхина А. В., Слепенчук А. А., Еськин А. А. Влияние концентрации электролита на эффективность флотационного извлечения. Обзор работ // *Международный научно-исследовательский журнал Research Journal of International Studies*. – 2013. – № 6(13). – С. 56–60.
25. Wang B., Yunjun Peng Yu The effect of salt water on mineral flotation is a critical review // *Mineral Development*. 2014, vol. 66, pp. 13–24. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.04.017. **MIAB**

## REFERENCES

1. Verkhoturov M. V., Amelin S. A., Konnova N. I. Diamond enrichment. *International Journal of Experimental Education*. 2012, no. 2, pp. 61. [In Russ].
2. 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.
3. Zlobin M. Technology of coarse-grained flotation in the enrichment of diamond-bearing ores. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 1, pp. 87–89. [In Russ].
4. Zhang J., Kuznetsov D., Yub M. Improving the separation of diamond from vein minerals. *Minerals Engineering*. 2012, vol. 36-38, no. 6, pp. 168–171. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.03.015168171.
5. Morozov V. V., Dvoichenkova G. P., Kovalenko E. G., Timofeev A. S., Kuryanov M. V. Justification of water circulation closing in froth flotation cycle of diamond-bearing kimberlites by mathematical modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12, pp. 5–19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_12\_0\_5.
6. Verkhoturova V. A., Elshin I. V., Nemarov A. A., Tolstoy M. Yu., Ostrovskaya G. H. Scientific substantiation and selection of the optimal option for restoring the hydrophobic properties of the surface of diamonds from the ore of the tube «International». *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014, no. 8(91), pp. 50–56. [In Russ].
7. Morozov V. V., Kovalenko E. G., Dvoichenkova G. P., Slightly V. A. The choice of temperature modes of conditioning and flotation of diamond-containing kimberlites by compound collectors. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 4, pp. 287–297. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-10-23.
8. Dvoichenkova G. P., Kovalenko E. G., Timofeev A. S., Podkamennyi Yu. A. Enhanced efficiency of diamond foam separation after complex removal of hydrophilic slime coats from

diamond surface. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10, pp. 20–38. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_10\_0\_20.

9. Pestryak I. V. Modeling and analysis of physicochemical processes in recirculating water conditioning. *Journal of Mining Science.* 2015, vol. 51, no. 4, pp. 811–818. DOI: 10.1134/S1062739115040189.

10. Vilasó-Cadre J., Nolasco-Cuenca M., Ávila-Márquez D., Arada-Pérez A., Gutiérrez-Castañed E., Reyes-Domínguez I., Blanco-Flores A. Evaluation of the statistical reliability of micro-flotation experiments using a hallimond flotation cell. *Canadian Metallurgical Quarterly.* 2022. DOI: 10.1080/00084433.2022.2160899.

11. Mahoney J., Monroe C., Swartley A. M. Surface analysis using X-ray photoelectron spectroscopy. *Spectroscopy Letters.* 2020, vol. 53, no. 10, pp. 726–736. DOI: 10.1080/00387010.2020.1824197.

12. El-Azazy M., El-Shafie A. S., Al-Saad K. Introductory chapter. *Infrared Spectroscopy – Principles and Applications*, 2023, 220 p. DOI: 10.5772/intechopen.109139.

13. Huhtamaki T., Tian X., Korhonen Y., Robin R. Determination of the wetting characteristics of the surface by measuring the wetting angle. *Nature Protocols.* 2018, vol. 13, pp. 1521–1538. DOI: 10.1038/s41596-018-0047-0.

14. Batushkin A. N., Baichenko A. A. Assessment of the collective properties of apolar reagents in the apparatus of non-emergency flotation. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University.* 2005, no. 6(51), pp. 73–75. [In Russ].

15. Alikina Yu. A., Kalashnikova T. A., Golubeva O. Yu. Sorption capacity of kaolinite group aluminosilicates of various morphologies. *Glass Physics and Chemistry.* 2021, vol. 47, no. 1, pp. 56–64. [In Russ].

16. Zinchuk N. N. On the features of studies of postmagmatic and hypergenic changes of kimberlite rocks. *Otechestvennaya Geologiya.* 2021, no. 5, pp. 26–42. [In Russ]. DOI: 10.47765/0869-7175-2021-10026.

17. Hero A. O., Fleury G. Pareto-optimal methods of gene ranking: Genomic signal processing. *Journal of VLSI Signal Processing.* 2004, vol. 38, no. 3, pp. 259–275. DOI: 10.1023/B:VLSI.0000042491.03225.cf.

18. Engel T., Reid P. *Physical chemistry: Thermodynamics, statistical thermodynamics, and kinetics.* 2020, 682 p.

19. Voigt M., Marieni C., Clark D., Gislason S., Oelkers E. Evaluation and refinement of thermodynamic databases for mineral carbonation. *Energy Procedia.* 2018, vol. 146, pp. 81–91. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.012.

20. Lunevich L. Aqueous silica and silica polymerisation. *Desalination – Challenges and Opportunities.* 2019. DOI: 10.5772/intechopen.84824.

21. Baltakis K., Yauberti R., Siautsiunas R., Kaminskas R. The effect of SiO<sub>2</sub> modification on the formation of calcium silicate hydrate. *Materials Science-Poland.* 2007, vol. 25, no. 3, pp. 663–670.

22. 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, no. 8, pp. 135–147. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_8\_0\_135.

23. Deryagin B. V., Churaev N. V., Muller V. M. *Poverkhnostnye sily* [Surface forces], Moscow, Nauka, 1985, 398 p.

24. Tkach N. S., Amyokhina A. V., Slepenchuk A. A., Eskin A. A. The effect of electrolyte concentration on the efficiency of flotation extraction. *Research Journal of International Studies.* 2013, no. 6(13), pp. 56–60. [In Russ].

25. Wang B., Yunjun Peng Yu The effect of salt water on mineral flotation is a critical review. *Mineral Development.* 2014, vol. 66, pp. 13–24. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.04.017.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

*Коваленко Евгений Геннадьевич* — канд. техн. наук, главный инженер, институт «Якутнипроалмаз», e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru, ORCID ID: 0000-0002-0320-0839,

*Двойченкова Галина Петровна* — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр РАН; Мирнинский политехнический институт, филиал Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, e-mail: dvoigp@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-3637-7929,

*Поливанская Валерия Владимировна*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: vpolivaskaya@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1973-0914,

<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, Professor, e-mail: dchmggu@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-4105-944X,

*E.G. Kovalenko*, Cand. Sci. (Eng.), Chief Engineer, «Yakutnioproalmaz» Institute of the ALROSA JSC, Republic of Sakha (Yakutia), 678174, Mirny, Russia, e-mail: kovalenkoeg@alrosa.ru, ORCID ID: 0000-0002-0320-0839,

*G.P. Dvoichenkova*, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia; Mirny Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University, 678174, Mirny, Russia, e-mail: dvoigp@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-3637-7929,

*V.V. Polivanskaya*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: vpolivaskaya@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1973-0914,

<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 17.10.2023; получена после рецензии 11.11.2023; принята к печати 10.12.2023.  
Received by the editors 17.10.2023; received after the review 11.11.2023; accepted for printing 10.12.2023.