

А.Ф. Махрачев, Г.П. Двойченкова, С.П. Лезова

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПАУНДНЫХ СОБИРАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПЕННОЙ СЕПАРАЦИИ АЛМАЗОВ

Аннотация. Применяемый в качестве собирателя процессе пенной сепарации мазут флотский Ф-5 характеризуется колебаниями состава и свойств вследствие колебаний состава используемого для его приготовления топливного мазута М-40. Для поддержания стабильности процесса целесообразно проводить контроль свойств поставляемого собирателя и доводку его технологических свойств корректировкой фракционного состава. Для оперативного контроля свойств компаундного собирателя использован показатель конденсированности ПК, рассчитываемый как произведение плотности и динамической вязкости. Анализ зависимости извлечения алмазов показывает, что максимум извлечения алмазов достигается в определенном интервале значений ПК компаундного собирателя. Разработана методика контроля качества и расчета скорректированного компонентного состава собирателя, предполагающая увеличение или уменьшение долей компонентов в случае выхода критерия качества за границы рекомендованного диапазона значений ПК. Результатами промышленных испытаний подтверждена эффективность применения компаундного собирателя на базе водонефтяной эмульсии ВНЭ-10 и мазута Ф-5 для флотационного извлечения алмазов из хвостов гравитационного обогащения руды трубки «Удачная».

Ключевые слова: алмазы, пенная сепарация, компаундные собиратели, водонефтяная эмульсия, флотский мазут, вязкость, фракционный состав.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-178-185

Перспективным путем решения задачи повышения извлечения технических алмазов в процессе пенной сепарации является применение компаундных собирателей, представляющих собой смесь нефтепродуктов различной молекулярной массы, плотности и вязкости, характеризующихся адсорбционной активностью к алмазам и обеспечивающие закрепление гидрофобизированных алмазов на границе жидкое — газ [1]. Наибольшей гидрофобизирующей способностью обладают высокомолекулярные ароматические фракции нефти [2]. Однако они недостаточно активно закрепляются на поверхности алмазов вследствие высокой вязкости [3]. При пенной сепарации алмазов применяется

эффект компаундирования, когда высоковязкая фракция с высокой собирательной способностью разбавляется низкомолекулярной фракцией с малой вязкостью [4]. При использовании компаундного собирателя из мазута М40 и дизельного топлива (флотского мазута Ф5) достигается высокое извлечение алмазов в пенный продукт. Однако показатели процесса часто ухудшаются, что связывают с изменением свойств поставляемого мазута флотского [5].

При использовании компаундного собирателя из мазута флотского Ф-5 и активированных водонефтяных эмульсий рудника «Интернациональный» ВНЭ-10 также достигается высокое, но не стабильное извлечение алмазов в концент-

рат. Причинами нестабильности показателей пенной сепарации является изменение фракционного состава и свойств компонентов собирателя. Задачей настоящих исследований было установление оптимального состава компаундных собирателей и выбор методик анализа свойств собирателя.

На большинстве предприятий АК «АЛРОСА» в процессе пенной сепарации используется мазут флотский Ф-5. Данный продукт характеризуется заметными колебаниями состава и свойств. Так плотность Ф-5 колеблется от 930 до 960 г/см³, а динамическая вязкость при 20 °С от 12 до 22 мПа · с.

Для определения оптимальных параметров состава компаундного собирателя были поставлены флотационные эксперименты на смеси топливного мазута М-40 и дизельного топлива (летнего). Для исследований предварительно были приготовлены чистые фракции мазута М-40 и смеси вышеназванных нефтепродуктов при массовой доле М-40 от 40 до 90%. Одновременно с проведением исследований измерялись характеристики компаундного собирателя, представленные в табл. 1.

Анализ данных в табл. 1 показал, что смешивание мазута М-40 с дизтопли-

вом приводит к постепенному снижению плотности и температуры замерзания, резкому и существенному снижению динамической вязкости получаемой смеси.

Смесь М-40 и дизельного топлива применялась в опытах в качестве собирателя для пенной сепарации пробы алмазосодержащих материалов – хвостов гравитационного обогащения. Собирательные свойства исследуемых реагентов оценивались по уровню извлечения алмазов в концентрат. Графики зависимостей извлечения алмазов в концентрат от доли М-40 в компаундном собирателе, представленные на рис. 1, показывают, что в области объемных соотношений от 7:3 до 6:4 (от 70 до 60% М-40) проявляется эффект возрастания собирательной способности смесей мазута М-40 и дизельного топлива летнего.

Для оценки эффективности фракционного состава собирателя был предложен критерий – показатель конденсированности ПК [8] рассчитываемый как произведение плотности и динамической вязкости или измеряемый методом осцилляционной вискозиметрии [9, 10] с использованием вибрационного вискозимера SV-10.

Исходными данными для выбора оптимальных параметров компаундного

Таблица 1

Состав и характеристика собирателей, приготовленных на основе мазута М-40 и дизельного топлива

Composition and characteristics of collectors prepared from fuel oil M-40 and diesel fuel

Состав композиций		Плотность, г/см ³	Динамическая вязкость при 20 °С, мПа	T _{заст.} , °С
мазут М-40	дизельное топливо			
100	0	0,987	53,6	-5,5
90	10	0,975	28,3	-7,0
80	20	0,961	21,7	-8,0
70*	30	0,952	16,1	-9,1
60*	40	0,945	13,1	-10,3
50	50	0,931	9,5	-11,2
40	60	0,914	6,6	-12,4

* Композиция приблизительно соответствует мазуту флотскому Ф-5.

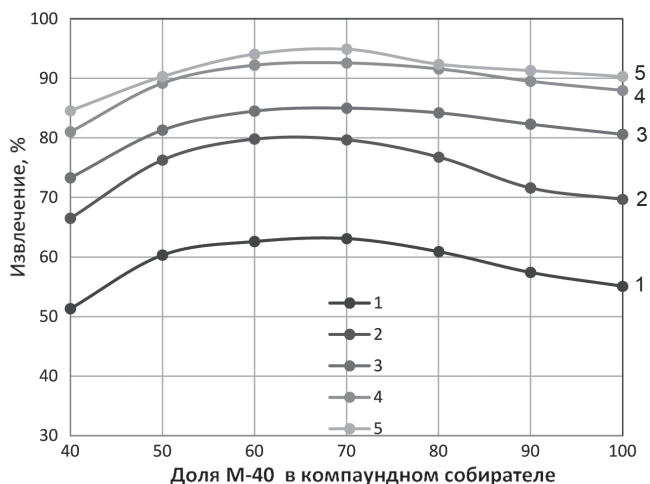


Рис. 1. Зависимость извлечения алмазов в концентрат (%) от доли мазута М-40 в смеси с дизельным топливом при расходах реагентов: 1 – 125 г/т; 2 – 325 г/т; 3 – 650 г/т; 4 – 875 г/т; 5 – 1050 г/т

Fig. 1. Diamond recovery in concentrate (%) versus portion of fuel oil M-40 in the mixture with diesel fuel at different consumptions of reagents: 1–125 g/t; 2–325 g/t; 3–650 g/t; 4–875 g/t; 5–1050 g/t

собиранья являлись результаты регрессионного анализа связей по флотиремости алмазов и физико-химических характеристик компонентов собирателя. При проведении исследований использовались данные результатов флотации алмазов (извлечение), плотности и вязкости используемого собирателя. Иссле-

дуемым компонентом был и расход собирателя в ограниченном интервале варьирования (875–1050 г/т).

Анализ зависимости извлечения алмазов от плотности собирателя – флотского мазута, полученного смешиванием мазута М-40 и дизельного топлива летнего показывает, что максимум изв-

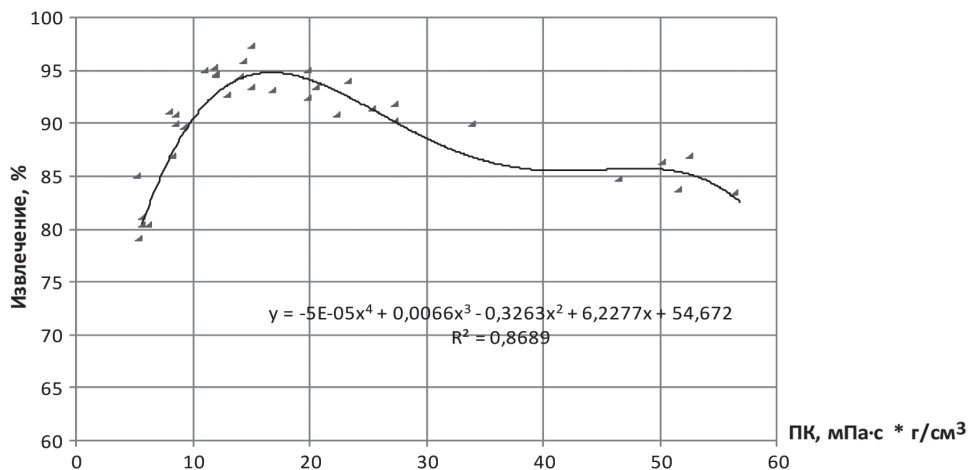


Рис. 2. Зависимость извлечения алмазов от показателя конденсированности (ПК) компаундного собирателя – смеси мазута топочного М-40 и дизельного топлива летнего

Fig. 2. Diamond extraction as function of condensation factor CF of compound collector–mixture of fuel oil M-40 and summer diesel fuel

лечения алмазов достигается при значении $PK = 16,0 \text{ мПа} \cdot \text{с} / \text{г/см}^3$ (рис. 2). Интервал значений PK собирателя, в котором достигается максимальный положительный эффект (более 93% извлечения) — от 12 до 22,5 $\text{мПа} \cdot \text{с} / \text{г/см}^3$.

Необходимо обратить внимание, что при росте значений показателя конденсированности снижение показателей происходит постепенно, в то время как при уменьшении показателя конденсированности менее 12 $\text{мПа} \cdot \text{с} / \text{г/см}^3$ происходит скачкообразное снижение извлечения алмазов. Это говорит о том, что чрезмерное разжижение собирателя весьма опасно. Для уменьшения разжиженности собирателя (повышения вязкости) целесообразно увеличивать добавки топливного мазута или водонефтяных эмульсий.

При создании новых реагентов и выборе режимов пенной сепарации было предложено использовать водонефтяные эмульсии, получаемые из нефтешламов, попутно добываемые с алмазосодержащими кимберлитами [4, 5]. В качестве объекта для настоящих исследований в качестве исходного сырья для разрабатываемых компаундных собирателей были использованы нефтешламы рудников «Интернациональный».

Органическая часть исходного флюида нефтешламов представлена сложной смесью нефтяных компонентов. Приме-

нительно к нефтепродуктам нерегулярного состава и строения разработаны технологии активации, необходимые для придания им лучшей транспортируемости или улучшения способности к горению в теплогенерирующих установках [11].

Результаты физико-химических показателей отобранных проб ВНЭ показывают, что после виброструйной электромагнитной обработки нефтешламов динамическая и кинематическая вязкость водонефтяной эмульсии уменьшается. Уменьшение вязкости при увеличении времени обработки до 3 мин составляет 10–12%. Такой результат принципиально соответствует результатам исследований, проведенных на других объектах — природной нефти, где после применения виброструйной магнитной активации достигалось снижение вязкости на 6–9%. Уменьшение вязкости свидетельствует о проявлении межмолекулярного взаимодействия при взаиморастворении углеводородных фракций [12].

Для определения собирательных свойств водонефтяной активированной эмульсии ВНЭ-10, из нефтяного флюида, попутно извлеченного на руднике «Интернациональный», в смеси с мазутом флотским Ф-5 были выполнены флотационные опыты с использованием в качестве реагента-собирателя смесей исходных нефтепродуктов в различных

Таблица 2

Состав и характеристика композиций, приготовленных из флотского мазута Ф-5 и активированной водонефтяной эмульсии рудника «Интернациональный» (ВНЭ-10)
Composition and characteristics of mixes prepared from bunker oil F-5 and activated water-in-oil emulsion at Internatsionalny Mine (VNE-10)

Состав композиций		Плотность, г/см^3	Динамическая вязкость при 20 °С, мПа	$T_{\text{заст.}}$, °С
ВНЭ (10)	мазут Ф-5			
0	100	0,907	7,4	-15,0
20	60	0,910	9,1	-14,8
40	90	0,915	14,1	-13,3
60	40	0,920	18,5	-12,2
80	20	0,924	24,6	-11,4

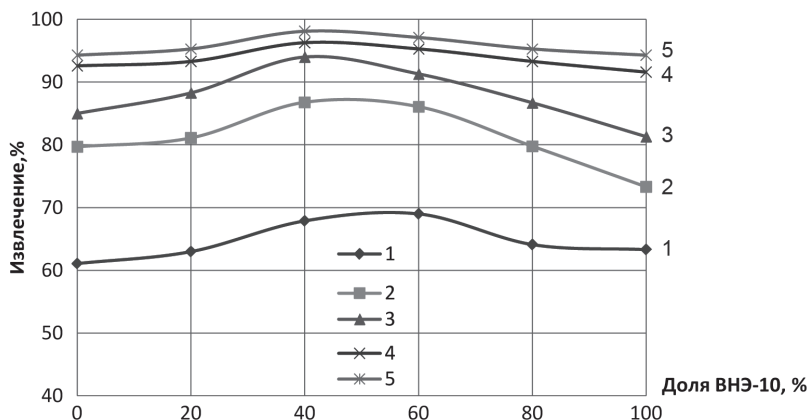


Рис. 3. Зависимость извлечения алмазов в концентрат (%) от доли активированной ВНЭ-10 в композиционном собирателе при расходах реагентов: 1 – 125 г/т; 2 – 325 г/т; 3 – 650 г/т; 4 – 875 г/т; 5 – 1050 г/т

Fig. 3. Diamond extraction in concentrate (%) as function of portion of activated VNE-10 in compound collector at different consumptions of reagents: 1– 125 g/t; 2– 325 g/t; 3– 650 g/t; 4– 875 g/t; 5– 1050 g/t

соотношениях. Для исследований предварительно были приготовлены чистые реагенты и смеси вышеназванных нефтепродуктов при массовой доле ВНЭ-10 20, 40, 60 и 80%. Одновременно с проведениями исследований измерялись характеристики компаундного собирателя, представленные в табл. 2.

Собирательные свойства смеси мазута флотского Ф-5 и активированной ВНЭ-10 превышают собирательные свойства каждого из них отдельно взятого. Анализ зависимостей на рис. 3 показывает, что проявляется эффект увеличения собирательной способности смесей мазута Ф-5 и активированной водонефтяной эмульсии ВНЭ-10, наиболее сильно проявляющийся в области объемных соотношений от 4:6 до 6:4 (от 40 до 60% ВНЭ-10 и проявляющийся в увеличении извлечений алмазов на 3,7–8,8%.

Для оценки эффективности фракционного состава собирателя был использован критерий – показатель конденсированности ПК [8]. Анализ зависимости извлечения алмазов от показателя конденсированности собирателя показывает, что максимум извлечения (более 96%

извлечения) достигается в интервале значении ПК от 9 до 17,5 мПа · с*г/см³.

Значение показателя детерминированности зависимости извлечения алмазов от показателя конденсированности ($R^2 = 0,79$) существенно выше, чем при использовании в качестве критериев плотности и вязкости собирателя (0,63–0,71). Полученные результаты позволяют рекомендовать показатель конденсированности (ПК) для оценки и оптимизации компонентного состава применяемого компаундного собирателя, осуществление которой возможно путем корректирования соотношения нефтепродуктов в компаундном собирателе, или добавками низкомолекулярных фракций – например дизельного топлива.

Проверка результатов лабораторных экспериментов проводилась наобогатительной фабрике Удачинского ГОКа. В реагентном отделении обогатительной фабрики проводилось смешивание ВНЭ-10 и флотского мазута в заданных пропорциях. От водонефтяной эмульсии ВНЭ-10 и мазута флотского Ф5 отбирались пробы и измерялись значения показателя конденсированности в процес-

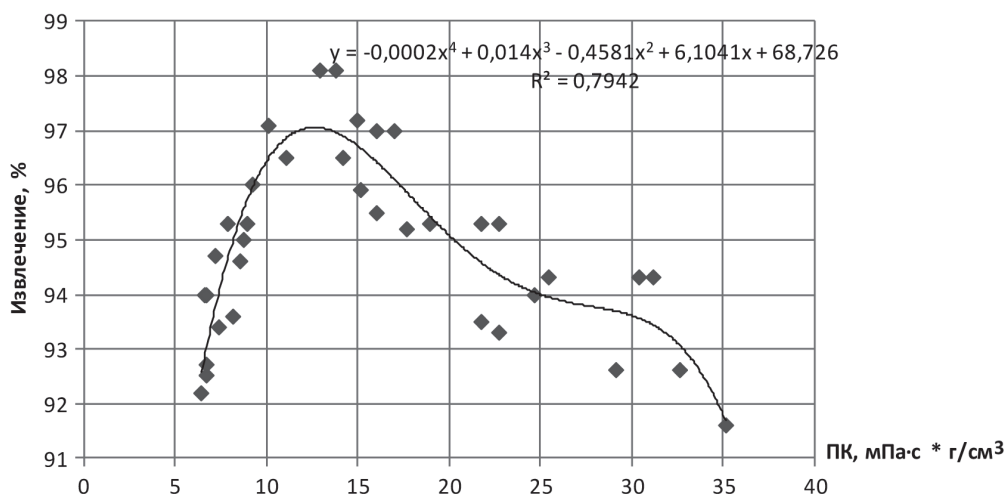


Рис. 4. Зависимость извлечения алмазов от показателя конденсированности (ПК) компаундного собирателя

Fig. 4. Curve of diamond recovery and condensation factor CF of compound collector

се их остывания. При подготовке проб и измерении температурной зависимости вязкости и плотности использовалась специальная методика. По значениям вязкости при 25 °С рассчитывалось значение показателя конденсированности водонефтяной эмульсии и мазута флотского. Рассчитанные значения показателей конденсированности нефтепродуктов компаундного собирателя сравнивались с нормативными граничными значениями и проводилась корректировка состава приготавливаемого компаундного собирателя.

Корректировка соотношения обеспечивала поддержание оптимального фракционного состава компаундного собирателя. Если плотность, вязкость и, следовательно, показатель конденсированности одного из компонентов или компаундного собирателя в целом превышали нормативное значение, то массовая доля ВНЭ-10, как более конденсированного компонента, в смеси уменьшалась. Если измеренное значение показателя конденсированности компонентов и компаундного собирателя были ниже необходимого, то увеличивали долю ВНЭ-10.

Полупромышленные испытания проводились на обогатительной фабрике № 12 Удачинского ГОКа. Результаты испытаний показали, что при использовании в качестве собирателя смеси ВНЭ-10 и Ф-5 в базовом соотношении 3:7, корректируемом в зависимости от значений ПК, извлечение алмазов в концентрат по классу крупности $-2+0,5$ мм повысилось на 1,5% и составило 98,66%. При этом расход смешанного собирателя сократился с 700 до 529 г/т. Расход пенообразователя ОПСБ составил 14,3 г/т, что на 5% меньше, чем его расход при использовании базового режима.

Результатами промышленных испытаний подтверждена эффективность применения водонефтяной эмульсии в составе компаундного собирателя ВНЭ-10 и Ф-5 в базовом соотношении 3:7 для флотационного извлечения алмазов из хвостов гравитационного обогащения руды трубки «Удачная». Экономический эффект за счет доизвлечения алмазов из обрабатываемого алмазосодержащего сырья на переделе пенной сепарации обогатительной фабрики № 12 составил 16,4 млн руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брагина В. И., Брагин В. И. Технология обогащения полезных ископаемых. — Красноярск: Изд. ИПК СФУ, 2009. — 289 с.
2. Авдохин В. М. Основы обогащения полезных ископаемых. Технологии обогащения полезных ископаемых, Т. 2. — М.: МГУ, 2006. — С. 162–164.
3. Зырянов И. В. Разработка и внедрение реагентных режимов на основе более эффективных собирателей для обогащения алмазов крупностью –2 мм флотационным способом: отчет о НИОКР. Тема 23-09-058. — Мирный: Якутнипроалмаз, 2010. — 89 с.
4. Кокина А. А. Изучение вязкостных характеристик продукта компаундирования гудрона с нефтяными разбавителями // Нефтепереработка и нефтехимия. — 2010. — № 5. — С. 21–23.
5. Горячев Б. Е. Технология алмазосодержащих руд. — М.: МИСИС, 2010. — 326 с.
6. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Островская Г. Х., Махрачев А. Ф., Ковальчук О. Е. Модифицирование свойств и экспериментальная апробация водонефтяных эмульсий в качестве реагентов-собирателей для процесса пенной сепарации алмазосодержащего сырья // Руда и металлы. — 2013. — № 5. — С. 58–64.
7. Двойченкова Г. П., Махрачев А. Ф., Островская Г. Х. Промышленная апробация модифицированных водонефтяных эмульсий в схемах пенной сепарации алмазосодержащего сырья с оценкой технологической эффективности полученных результатов в условиях ОФ № 3 МГОКа и ОФ № 12 УГОКа / Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Материалы Международного совещания «Плаксинские чтения». — Томск, 2013.
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. Viswanath D., Ghosh T., Prasad D., Dutt N., Rani K. Viscosity of liquids: theory, estimation, experiment and data. Springer, 2007. 660 p.
10. Gupta S. V. Viscometry for Liquids: Calibration of Viscometers. Springer, 2014. 428 p.
11. Посадов И. А., Поконова Ю. В., Прозорова И. В. и др. Изменение реологических свойств нефтей под воздействием виброструйной магнитной активации / Автоматизация и информационное обеспечение технологических процессов в нефтяной промышленности, т. 2. — Томск: Изд-во Томского университета, 2002.
12. Кувыкин В. И., Кувыкина Е. В. Вязкость смеси углеводородов // Естественные и математические науки в современном мире. — 2016 — № 1 (37). — С. 46–51. **ПИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Махрачев Александр Федорович — директор, Удачинский ГОК АК «Алроса», e-mail: makhrachev@alrosa.ru,
Двойченкова Галина Петровна — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ИПКОН РАН, e-mail: dvoigr@mail.ru,
Лезова Светлана Павловна — старший преподаватель, НИТУ «МИСИС», e-mail: svlezova@mail.ru.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 11, pp. 178–185.

Analysis and optimization of compositions of compound collectors for frother separation of diamonds

Makhrachev A.F., Director, Udachny GOK, JSC «ALROSA», 678170, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, e-mail: makhrachev@alrosa.ru,
Dvoychenkova G.P., Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia, e-mail: dvoigr@mail.ru,
Lezova S.P., Senior Lecturer, e-mail: svlezova@mail.ru, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

Abstract. Bunker oil F-5 applied as a collecting agent in frother separation has variable composition and properties as a consequence of inconstant formula of fuel oil M-40 used to prepare F-5. To maintain stable flotation, it is advisable to check the collective agent properties and to refine them by means of adjustment of its fractional composition. For the operative control over properties of the compound collector, the condensation factor CF is used as a product of density and dynamic viscosity. The analysis of the diamond recovery curves shows that the maximum extraction of diamonds is reached in a certain range of CF of the compound collector. The developed procedure of quality control and calculation of adjusted composition of the compound collector assumes an increase or a decrease in the portions of the components in case the quality criterion extends beyond the recommended range of CF. The commercial tests prove efficiency of the compound collector made of water-in-oil emulsion VNE-10 and bunker oil F-5 in flotation of diamonds from gravity concentration tailings at Udachnaya Pipe.

Key words: diamonds, frother separation, compound collectors, water-in-oil emulsion, bunker oil, viscosity, fractional composition.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-178-185

REFERENCES

1. Bragina V.I., Bragin V.I. *Tekhnologiya obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Mineral dressing technology], Krasnoyarsk, Izd. IPK SFU, 2009, 289 p.
2. Avdokhin V.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. Tekhnologii obogashcheniya poleznykh iskopaemykh*, T. 2 [Basis of mineral processing. Mineral dressing technologies, vol. 2], Moscow, MGGU, 2006, pp. 162–164.
3. Zyryanov I.V. Razrabotka i vnedrenie reagentnykh rezhimov na osnove bolee effektivnykh sobirateley dlya obogashcheniyaalmazov krupnost'yu –2 mm flotatsionnym sposobom: otchet o NIOKR [Development and introduction of reagent modes based on more efficient collectors for flotation of diamonds –2 mm in size: Research report], Mirny, Yakutniiproalmaz, 2010, 89 p.
4. Kokina A.A. Izuchenie vyazkostnykh kharakteristik produkta kompaundirovaniya gudrona s neftyanymi razbavitelyami [Viscous characteristics of compounding product of flux oil and petroleum solvents], *Neftepererabotka i neftekhimiya*. 2010, no 5, pp. 21–23. [In Russ].
5. Goryachev B.E. *Tekhnologiyaalmazosoderzhashchikh rud* [Diamond-bearing ore technology], Moscow, MISiS, 2010, 326 p.
6. Chanturiya V.A., Dvoychenkova G.P., Ostrovskaya G. Kh., Makhachev A. F., Koval'chuk O. E. Modifitsirovanie svoystv i eksperimental'naya aprobatsiya vodoneftyanykh emul'siy v kachestve reagentov-sobirateley dlya protsessa pennoy separatsiialmazosoderzhashchego syr'ya [Modification of properties and experimental approval of water-in-oil emulsions used as collecting agents in frother separation of diamond-bearing materials], *Ruda i metall*. 2013, no 5, pp. 58–64. [In Russ].
7. Dvoychenkova G.P., Makhachev A. F., Ostrovskaya G. Kh. Promyshlennaya aprobatsiya modifitsirovannykh vodoneftyanykh emul'siy v skhemakh pennoy separatsiialmazosoderzhashchego syr'ya s otsenkoy tekhnologicheskoy effektivnosti poluchennykh rezul'tatov v usloviyakh OF № 3 MGOKa i OF № 12 UGOKa [Commercial approval of modified water-in-oil emulsions in circuits of frother separation of diamond-bearing materials with evaluation of process efficiency of obtained results under conditions of processing plants nos. 3 and 12 of Mining and Processing Works]. *Innovatsionnye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki mineral'nogo syr'ya. Materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya «Plaksinskie chteniya»*. Tomsk, 2013. [In Russ].
8. Makhachev A. F. Povyshenie effektivnosti reagentov-sobirateley dlya flotatsiialmazov na osnove vibrostruynoy magnitnoy aktivatsii [Improvement of efficiency of collecting agents for diamond flotation based on vibro-jet magnetic activation]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii «Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya*. Ekaterinburg, 2018, pp. 122–126. [In Russ].
9. Viswanath D., Ghosh T., Prasad D., Dutt N., Rani K. *Viscosity of liquids: theory, estimation, experiment and data*. Springer, 2007. 660 p.
10. Gupta S.V. *Viscometry for Liquids: Calibration of Viscometers*. Springer, 2014. 428 p.
11. Posadov I.A., Pokonova YU.V. Prozorova I.V. Izmenenie reologicheskikh svoystv neftey pod vozdeystviem vibrostruynoy magnitnoy aktivatsii. Avtomatizatsiya i informatsionnoe obespechenie tekhnologicheskikh protsessov v neftyanoy promyshlennosti, t. 2 [Change in rheological properties of oils under vibro-jet magnetic activation. Automation and information support of processes in oil industry, vol. 2], Tomsk, Izd-vo Tomskogo universiteta, 2002.
12. Kuvykin V.I., Kuvykina E.V. Vyazkost' smesi uglevodorodov [Viscosity of mixture of hydrocarbons]. *Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire*. 2016, no 1 (37), pp. 46–51. [In Russ].