ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(11):112-125
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.765 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_112

РЕЗУЛЬТАТЫ СТЕНДОВОЙ АПРОБАЦИИ КОМБИНИРОВАННЫХ РЕЖИМОВ ПРИМЕНЕНИЯ РЕАГЕНТОВ МОДИФИЦИРОВАННОГО СОСТАВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕННОЙ СЕПАРАЦИИ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В УСЛОВИЯХ ЗАМКНУТОГО ВОДООБОРОТА

В.А. Чуть-Ды[1], Г.П. Двойченкова[2,3], А.Л. Бабушкина[1], А.Ю. Масанов[4], А.С. Тимофеев[2]

[1] Научно-исследовательский и проектный институт алмазодобывающей промышленности «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия
[2] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия, e-mail: dvoigp@mail.ru
[3] Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, Мирный, Россия
[4] Центр инноваций и технологий, АК «АЛРОСА» (ПАО), Москва, Россия

Аннотация: Выполнены стендовые испытания комбинированных режимов применения реагентов модифицированного состава для повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащего сырья в условиях замкнутого водооборота, по результатам которых: установлена эффективность новых модифицированных реагентов на основе мазутов Ф5, Ф14, М40, Ф14+ЭМК, М40+ОКС, М40-20, М40-20+ОКС за счет повышения извлечения алмазов в концентрат опытной пенной сепарации на 5–17% по сравнению с базовым извлечением (58%); установлена эффективность применения диспергатора ОП-4А в составе реагентного режима опытной пенной сепарации с повышением извлечения алмазов в концентрат на 35–42% в условиях использования всех модифицированных реагентов-собирателей по сравнению с базовым извлечением (58%); установлена эффективность применения антискалантов НТФ-20 и АКВА-ИС-3 в составе реагентного режима опытной пенной сепарации за счет повышения извлечения алмазов в концентрат на 12% по сравнению с базовым извлечением (58%). На основании полученных результатов разработаны и приняты к использованию рекомендации для проведения опытно-промышленных испытаний установленных реагентных режимов в условиях процессов пенной сепарации на обогатительных фабриках АК «АЛРОСА».

Ключевые слова: реагенты, пенная сепарация, флотация, собиратели, антискаланты, диспергаторы, пульпа, эффективность, концентрат, оборотная вода, шламы, технологическая схема.

Для цитирования: *Чуть-Ды В. А., Двойченкова Г. П., Бабушкина А. Л., Масанов А. Ю., Тимофеев А. С.* Результаты стендовой апробации комбинированных режимов применения реагентов модифицированного состава для повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащего сырья в условиях замкнутого водооборота // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11. – С. 112–125. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_112.

Bench-scale testing of mixed-mode application of modified reagents to enhance efficiency of froth separation of diamond-bearing raw materials in closed water circulation system

V.A. Chut-Dy[1], G.P. Dvoichenkova[2,3], A.L. Babushkina[1], A.Yu. Masanov[4], A.S. Timofeev[2]

[1] Research and Design Institute of the Diamond Mining Industry «Yakutniproalmaz», AK ALROSA (PJSC), Mirny, Russia

[2] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: dvoigp@mail.ru

[3] Polytechnic Institute (branch) of the North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Mirny, Russia

[4] Center for Innovation and Technology, AK ALROSA (PJSC), Moscow, Russia

Abstract: Bench-scale testing of mixed-mode application of modified reagents are implemented with a view to enhancing efficiency of froth separation of diamond-bearing raw materials in a closed water circulation system. The test results ascertained efficiency of: new modified reagents on the basis of mazut types F5, F14, M40, F14+EMK, M40+OKS, M40-20 and M40-20+OKS owing to the increased diamond recovery in the experimental froth separation concentrate by 5–17% as compared with the base recovery (58%); dispersant OP-4A in the reagent mode of the experimental froth separation, at the increased diamond recovery by 35–42% in case of all modified collecting reagents as compared with the base recovery (58%); antiscalants NTF-20 and Aqua-IS-3 in the reagent mode of the experimental froth separation owing to the increased diamond recovery by 12% as compared with the base recovery (58%). Using the obtained results, the recommendations are developed and approved for the pilot testing of the established reagent modes in froth separation at concentration plants of ALROSA.

Key words: reagents, froth separation, flotation, collectors, antiscalants, dispersants, pulp, efficiency, concentrate, recycled water, slime, process flowsheet.

For citation: Chut-Dy V. A., Dvoichenkova G. P., Babushkina A. L., Masanov A. Yu., Timofeev A. S. Bench-scale testing of mixed-mode application of modified reagents to enhance efficiency of froth separation of diamond-bearing raw materials in closed water circulation system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(11):112-125. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_11_0_112.

Введение

Ограниченность запасов и ухудшение качества минерального сырья основных алмазосодержащих месторождений Западной Якутии обуславливает актуальность и необходимость разработки методов и процессов глубокой переработки кимберлитовых руд текущей добычи, в том числе модифицирования состава применяемых реагентов и усовершенствования режимов их применения в существующей технологии пенной сепарации (ПС) извлечения алмазных кристаллов. Глубокая переработка алмазосодержащих труднообогатимых кимберлитов обоснована высоким (около 40% общего количества) содержанием алмазов крупностью –2 мм, составляющих более 20% стоимости товарной продукции [1 – 4].

В технологических схемах обогатительных фабрик (ОФ) АК «АЛРОСА» процесс пенной сепарации является заключительным циклом, позволяющим извлекать технические (–2 мм) алмазы, невозвратные потери которых составля-

ют, по последним данным ОТК, более 25% [5, 6].

В институте ИПКОН РАН под научным руководством академика РАН В.А. Чантурия разработан ряд методов для повышения эффективности пенной сепарации, которые апробированы совместно с институтом «Якутнипроалмаз» в промышленных технологических схемах переработки алмазосодержащих кимберлитов [7, 8].

В качестве собирателя для процесса пенной сепарации в настоящее время применяются реагенты на основе мазута, нефтяных продуктов и водонефтяных эмульсий в комплексе с аэрофлотом, а также с использованием пенообразователя ОПСБ, по исследованию эффективности которых выполнен ряд экспериментальных работ институтами ИПКОН РАН и «Якутнипроалмаз», и результаты этих работ частично включены в соответствующие технологические регламенты.

Основной недостаток используемых реагентов-собирателей заключается в отсутствии стабильности свойств и несоответствии состава требованиям технологического процесса пенной сепарации.

Кроме того, согласно проведенным в последние годы исследованиям, недостаточно устойчивое закрепление на поверхности алмазных кристаллов применяемых собирателей увеличивает потери алмазов, что подтверждается соответствующими экспериментальными данными, на основании которых установлена необходимость применения реагентов-регуляторов, обеспечивающих селективность действия собирателей за счет удаления с поверхности извлекаемых кристаллов гидрофилизирующих минеральных образований [9 — 11].

Таким образом, результатами совместных исследований институтов ИПКОН РАН и «Якутнипроалмаз» в качестве основных факторов, снижающих эффективность пенной сепарации, установлены:

- потери алмазов, обусловленные наличием на их поверхности гидрофилизирующих шламовых и пленочных минеральных образований;
- низкая селективность используемых реагентов, применяемых в условиях замкнутого водооборота процесса пенной сепарации, обусловленная высокой минерализацией и резкими перепадами температур водной фазы рудной пульпы [12, 13].

В настоящих исследованиях предложена и апробирована идея снижения влияния вышеуказанных факторов за счет применения модифицированных реагентов-собирателей в комбинированных режимах их совместного использования с реагентами-регуляторами, состав которых обеспечивает изменение параметров свойств водоминеральных суспензий в соответствии с технологическими требованиями процесса пенной сепарации, обеспечивающими максимальное извлечение алмазных кристаллов [14 — 16].

Опытное оборудование и методика исследований

Согласно утвержденной методике, институтами ИПКОН РАН и «Якутнипроалмаз» выполнена экспериментальная апробация комбинированных режимов применения реагентов модифицированного состава для повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащего сырья в условиях замкнутого водооборота.

В качестве объектов исследований принят процесс опытной пенной сепарации алмазосодержащего материала.

В качестве предметов исследований изучены флотационные реагенты-собиратели и реагенты-регуляторы, добавки для модифицирования их свойств при-

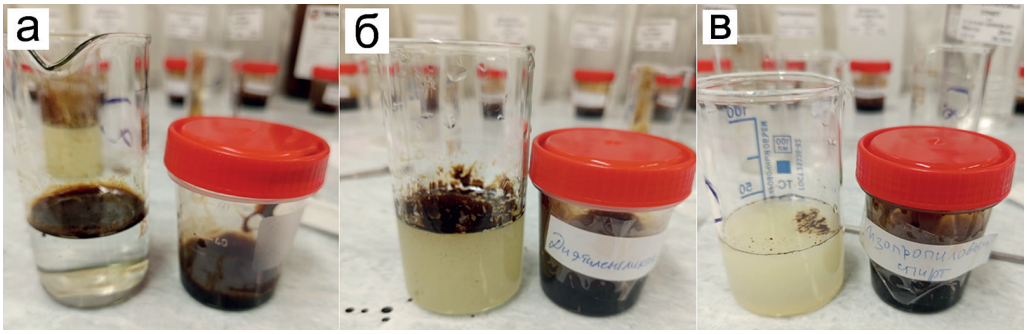

Рис. 1. Проявление эффекта автодиспергирования мазута в воде: чистый мазут (нет автодиспергирования) (а); мазут с добавкой № 1 (диэтиленгликоль) (б); мазут с добавкой № 2 (изопропиловый спирт) (в)
Fig. 1. Manifestation of the effect of autodispersion of fuel oil in water, where: pure fuel oil (no autodispersion) (a); fuel oil with additive No. 1 (diethylene glycol) (b); fuel oil with additive No. 2 (isopropyl alcohol) (v)

Таблица 1

Перечень исследуемых в экспериментальных условиях реагентов
List of reagents studied under experimental conditions

Номер образца	Наименование образца	Сокращение
Собиратели		
1	Мазут флотский Ф5 с добавлением изобутилового спирта	Ф5+ИБС
2	Мазут флотский Ф5 с добавлением этилметилкетона	Ф5+ЭМК
3	Мазут топочный М40	М40
4	Мазут топочный М40 с добавлением ОКСИПАВ	М40+ОКС
5	Мазут топочный М40 с добавлением изопропилового спирта	М40+ИПС
6	Мазут топочный М40 с добавлением 20 % дизельной фракции	М40–20
7	Мазут топочный М40 с добавлением 20 % дизельной фракции и ОКСИПАВ	М40–20+ОКС
Антискаланты		
8	Оксиэтилиден-дифосфоновой кислоты комплексонат	ОЭДФ-25
9	Экохелатон	Экохелатон
10	Нитрилотриметилфосфоновой кислоты комплексонат	НТФ-20
11	АКВА-ИС-3	АКВА-ИС-3
Диспергаторы		
12	Полиэтиленгликоль	ПЭГ-400
13	Эмульгатор	ОП-4А
Депрессоры		
14	FL9-A	FL9-A
15	Натрия триполифосфат	ТПФ
16	Декстрин	Декстрин
17	Камцел-600	Камцел-600
18	ПАЦ-НВ	ПАЦ-НВ

менительно к условиям пенной сепарации алмазосодержащего материала в условиях замкнутого водооборота, а также режимы их совместного использования.

Модифицированные собиратели, предоставленные институтом ИПКОН РАН, приготовлены на основе мазутов Ф-5 и М-40 с использованием добавок, придающих собирателю свойство автодиспергирования в водной фазе. Пример таких собирателей приведен на рис. 1.

В качестве реагентов-регуляторов использованы диспергаторы, антискаланты и депрессоры, состав которых позволял изменить свойства водоминеральных суспензий, поверхности извлекаемых алмазов и собирателя — модифицированного мазута до значений, при которых обеспечивается эффективность их совместного применения в процессе пенной сепарации. Перечень используемых реагентов приведен в табл. 1 [17 — 20].

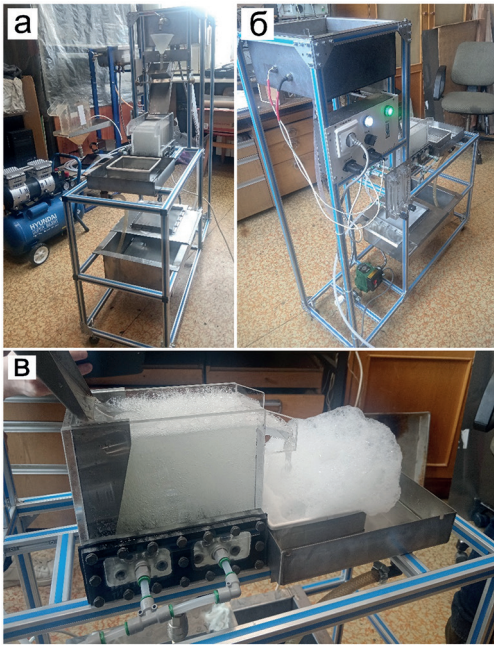

Рис. 2. Внешний вид (а, б) и камера пенной сепарации (в) лабораторной флотационной машины
Fig. 2. External view (a, b) and foam separation chamber (v) of a laboratory flotation machine

В соответствии с методикой проведения исследований и распоряжением АК «АЛРОСА» эксперименты выполнены с использованием природных алмазов крупностью –1,6+1,2 мм и безалмазного кимберлитового материала крупностью –1,6+1,0 мм. Оборотная вода и реагенты для проведения испытаний были отобраны на обогатительных фабриках №3 Мирнинско-Нюрбинского ГОКа (МНГОКа) и №12 Удачнинского ГОКа (УГОКа).

Экспериментальная апробация выполнена с использованием модернизированной лабораторной флотационной машины (далее — ЛФМ), изготовленной специалистами ИПКОН РАН по техническому заданию института «Якутнипроалмаз». Внешний вид сепаратора приведен на фотографиях (рис. 2, *а*, *б*). Основная рабочая ячейка сепаратора представляет собой флотационную камеру (рис. 2, *в*), в которой происходит разделение кимберлитовой алмазосодержащей смеси на концентрат (алмазы, извлекаемые в пенный слой) и хвосты — кимберлитовый безалмазный материал, накапливаемый в объеме камеры.

Основные положения методики проведения экспериментальной апробации собирателей модифицированного состава и комбинированных режимов их применения совместно с реагентами-регуляторами для повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащего сырья в условиях замкнутого водооборота заключались в следующем:

1. Перед началом проведения испытаний лабораторная флотационная машина (опытный сепаратор) заполняется минерализованной оборотной водой (17 л), в которую добавляется пенообразователь ОПСБ (0,29 мл/л).

2. В каждом опыте используется навеска безалмазного кимберлитового ма-

териала массой 30 г, в которую вводятся кристаллы алмазов в количестве 20 шт и добавляется вода в соотношении Ж:Т — 1:0,5.

3. Приготовленная алмазокимберлитовая смесь перемешивается ручным способом в течение 3 мин для моделирования условий контакта алмазов с материалом и водой в мельницах самоизмельчения. Образующиеся при перемешивании тонкие шламы удаляются, и после обезвоживания в каждую навеску алмазосодержащего материала в определенной последовательности вводятся реагенты, с которыми производят кондиционирование подготовленной навески.

4. Обработанная таким образом алмазокимберлитовая смесь подается на пенный слой флотационной камеры опытного сепаратора, в котором происходит разделение (сепарация) материала на алмазные кристаллы (концентрат) и зерна кимберлита (хвосты).

5. По завершении каждого опыта материал концентрата и хвостов обезвоживается, сушится и направляется на ручную разборку для определения количества кристаллов алмазов в концентрате (пенный продукт) и хвостах (камерный продукт).

Оценка эффективности применения новых реагентов в процессе пенной сепарации проводилась по результатам каждой серии опытов с определением извлечения алмазов.

Стендовые испытания выполнены в три этапа:

• этап 1 — сравнительная оценка извлечения алмазов в концентрат опытной пенной сепарации при использовании модифицированных мазутов разработанного состава в условиях базового (фабричного) реагентного режима;

• этап 2 — испытания новых реагентов-регуляторов, используемых индивидуально в условиях базового (фабричного) реагентного режима;

• этап 3 — испытания комбинированных реагентных режимов опытной пенной сепарации алмазосодержащего материала с применением в определенной последовательности наиболее эффективных реагентов-собирателей и реагентов-регуляторов, установленных на этапах 1 и 2.

Результаты выполненных стендовых испытаний

Конечная цель выполненных стендовых испытаний заключалась в оценке эффективности комбинированных режимов применения новых реагентов для повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащего сырья в условиях замкнутого водооборота и выборе наиболее оптимальных сочетаний для промышленных испытаний в схеме обогатительных фабрик АК «АЛРОСА».

Стендовые испытания реализованы последовательно согласно вышеприведенным этапам.

На этапе 1 выполнена оценка извлечения алмазов в концентрат опытной пенной сепарации при использовании модифицированных мазутов разработанного состава в условиях базового (фабричного) реагентного режима, который, по данным обогатительных фабрик и с учетом экспериментальных данных института «Якутнипроалмаз», включает следующие реагенты и условия процесса:

• собиратель — мазут флотский Ф5 с добавлением дизельного топлива 14% (Ф14), при расходе 60 — 80 г/т;

• собиратель аэрофлот, при расходе 150 мл/т;

• вспениватель ОПСБ, при расходе 0,2 мл/л оборотной воды;

• содержание шламов в исходной алмазокимберлитовой навеске — 7%;

• уровень пенного слоя во флотационной камере 1,5 — 2,5 мм.

По результатам проведенной серии опытов в условиях базового реагентно-

го режима среднее извлечение алмазов в концентрат составило 58%. Данный показатель принят за контрольный в последующих экспериментах.

В экспериментальных исследованиях настоящего этапа изучены реагенты-собиратели разработанного состава, полученные на основе мазута флотского Ф5 и мазута топочного М40 с модифицирующими их свойства добавками (ДФ, ИБС, ЭМК, ОКС, ИПС). Результаты выполненных исследований приведены в табл. 2.

Согласно приведенным в таблице данным, по сравнению с базовым реагентом-собирателем Ф14 при расходе 60 — 80 г/т наиболее эффективными модифицированными собирателями установлены мазуты под номерами 3, 9, 11 и 12.

На этапе 2 выполнена оценка извлечения алмазов в концентрат опытной пенной сепарации при использовании реагентов-регуляторов, состав которых в условиях базового (фабричного) реагентного режима позволит повысить эффективность использования разработанных модифицированных реагентов-собирателей. В качестве исследуемых реагентов-регуляторов изучены диспергаторы (ПЭГ-400, ОП-4А) и антискаланты (НТФ-20, АКВА-ИС-3, Экохелатон, ОЭДФ-25).

Диспергаторы

Механизм действия реагентов-диспергаторов заключается в повышении адгезионной активности аполярных собирателей. Подача реагента-диспергатора проводилась непосредственно в процесс в виде 0,1% раствора. Изучение эффективности действия диспергаторов в исследуемых условиях выполнено в две стадии: вначале выполнена оценка их эффективности в условиях применения стандартного реагента-собирателя (Ф14). Результаты данной серии экспериментов приведены в табл. 3.

Согласно приведенным результатам, установлено, что эффективность процесса пенной сепарации в условиях применения диспергатора ОП-4А в 1,9 раза

Таблица 2

Результаты лабораторных исследований новых реагентов-собирателей
Results of laboratory studies of new collecting reagents

№ п/п	Реагент-собиратель		Расход аэрофлота, мл/т	Среднее извлечение, %
	наименование	расход, г/т		
1	Ф14 (базовый мазут)	60 — 80	150	58 (базовое извлечение)
2	Ф14 + ИБС	60 — 80	150	43
3	Ф14 + ЭМК	60 — 80	150	63
4	Ф5	60 — 80	150	50
5	Ф5 + ИБС	60 — 80	150	13
6	Ф5 + ЭМК	60 — 80	150	38
7	Ф5 + ОКС	60 — 80	150	25
8	М40	60 — 80	150	15
9	М40 + ОКС	60 — 80	150	72
10	М40 + ИПС	60 — 80	150	38
11	М40–20	60 — 80	150	65
12	М40–20 + ОКС	60 — 80	150	75

Таблица 3

Результаты исследований эффективности реагентов-диспергаторов в комплексе с базовым собирателем (Ф14)
Results of studies of the effectiveness of reagents-dispersants in combination with a basic collector (F14)

№ п/п	Наименование реагента-собирателя, (расход 60–80 г/т)	Реагент-диспергатор		Расход аэрофлота, мл/т	Среднее извлечение, %
		наименование	расход мл/т		
1	Ф14	ПЭГ-400	20	150	50
2	Ф14	ОП-4А	20	150	95
3	Ф14	–	–	150	58

выше, чем при использовании ПЭГ-400 (извлечение алмазов в концентрат составляет 95% и 50% соответственно), и в 1,6 выше по сравнению с базовым извлечением (58%) без использования диспергаторов.

Далее была проведена серия опытов с применением реагента-диспергатора ОП-4А (при различных его расходах) совместно с модифицированными реагентами-собирателями. Результаты экспериментов приведены в табл. 4.

Приведенными результатами установлено, что диспергатор ОП-4А повышает извлечение алмазов в концентрат пенной сепарации в условиях использования всех модифицированных реагентов-собирателей. Полученные результаты дали основание для рекомендации к использованию в последующих экспериментах диспергатора ОП-4А.

Антискаланты

Механизм действия антискалантов обеспечивает предупреждение образования гидрофильных пленок на поверхности алмазов. Изучение эффективности действия антискалантов в настоящих исследованиях выполнено в условиях применения стандартного реагента-собирателя (Ф14). Подача реагента-диспергатора в экспериментах проводилась непосредственно в процесс в виде 0,1% раствора. Результаты данной серии экспериментов приведены в табл. 5.

Приведенными результатами установ-

Таблица 4

Результаты исследований диспергатора ОП-4А в комплексе с модифицированными реагентами-собирателями
Results of studies of the OP-4A dispersant in combination with modified collecting reagents

№ п/п	Наименование реагента-собирателя, (расход 60–80 г/т)	Реагент-диспергатор		Расход аэрофлота, мл/т	Среднее извлечение, %
		наименование	расход, мл/т		
1	Ф5 + ИБС	ОП-4А	20	150	93
2	Ф5 + ЭМК	ОП-4А	20	150	98
3	Ф5 + ОКС	ОП-4А	17	150	95
4	М40 + ОКС	ОП-4А	20	150	88
5	М40 + ИПС	ОП-4А	20	150	93
6	М40–20	ОП-4А	17	150	95
7	М40–20 + ОКС	ОП-4А	17	150	100

Таблица 5

Результаты исследований эффективности реагентов-антискалантов в комплексе с базовым собирателем (Ф14)
Results of studies of the effectiveness of antiscalant reagents in combination with a basic collector (F14)

№ п/п	Наименование реагента-собирателя (базовый), (расход 60–80 г/т)	Реагент-антискалант		Расход аэрофлота, мл/т	Среднее извлечение, %
		наименование	расход, мл/т		
1	Ф14	НТФ-20	33	150	70
2	Ф14	НТФ-20	17	150	70
3	Ф14	АКВА-ИС-3	17	150	70
4	Ф14	Экохелатон	17	150	55
5	Ф14	ОЭДФ-25	17	150	60
6	Ф14	—	—	150	58 (базовое извлечение)

лено, что эффективность процесса пенной сепарации в условиях применения антискалантов НТФ-20 и АКВА-ИС-3 в 1,2 раза выше, чем при базовом реагентном режиме. Применение антискалантов Экохелатон и ОЭДФ-25 не позволяет повысить (по сравнению с базовым) среднее извлечение алмазов в концентрат в исследуемых условиях.

На основании анализа полученных результатов для экспериментальных условий этапа 3 приняты следующие реагенты:

- реагенты-собиратели (модифицированные мазуты): М40+ОКС, М40-20, М40-20+ОКС и Ф14+ЭМК при расходе 60 — 80 г/т;
- реагент-диспергатор ОП-4А при расходе (0,1%) — 17 мл/т;
- реагенты-антискаланты: НТФ-20 и АКВА-ИС-3 при расходе (0,1%) — 17 мл/т.

На этапе 3 выполнены испытания комбинированных реагентных режимов в схеме опытной пенной сепарации алмазосодержащего материала с применением в определенной последовательности наиболее эффективных реагентов-собирателей и реагентов-регуляторов, установленных на этапах 1 и 2 настоящих исследований. Эксперименты включали реагентные режимы пенной сепарации, содержащие различные комбинации разработанных на основе мазутов Ф5, Ф14, М40 модифицированных собирателей с антискалантами (НТФ-20, АКВА-ИС-3) и диспергатором ОП-4А, при использовании которых установлено максимальное повышение извлечения алмазов в концентрат по сравнению с базовым показателем (58%).

Результаты экспериментальных исследований, выполненных на данном этапе испытаний, представлены в табл. 6.

По приведенным в таблице данными видна максимальная эффективность реагентных режимов с использованием диспергатора. На основании полученных данных применение диспергатора было принято к обязательному включению в реагентные режимы, рекомендуемые для последующих опытно-промышленных испытаний в условиях обогатительных фабрик АК «АЛРОСА».

Для подтверждения эффективности применения антискалантов и диспергатора в условиях стендовых испытаний был поставлен контрольный опыт с использованием алмазных кристаллов с максимально гидрофильной поверхностью, извлечение которых в стандартных условиях равнялось 0.

Таблица 6

Результаты исследований новых реагентных режимов для пенной сепарации алмазосодержащего материала
Results of research of new reagent modes for foam separation of diamond-containing material

№ п/п	Реагент-собиратель		Антискаланты		Диспергаторы		Среднее извлечение, %
	наименование	расход, г/т	наименование	расход, мл/т	наименование	расход, мл/т	
1	Ф5 + ОКС	60 – 80	НТФ-20	17	–	–	85
2	М40-20	60 – 80	НТФ-20	17	–	–	50
3	М40-20+ОКС	60 – 80	НТФ-20	17	–	–	85
4	Ф14	60 – 80	НТФ-20	17	ОП-4А	17	90
5	Ф14 + ЭМК	60 – 80	НТФ-20	17	ОП-4А	17	100
6	Ф5	60 – 80	НТФ-20	17	ОП-4А	17	95
7	Ф5 + ЭМК	60 – 80	НТФ-20	17	ОП-4А	17	98
8	Ф5 + ОКС	60 – 80	НТФ-20	17	ОП-4А	17	75
9	М40 + ОКС	60 – 80	НТФ-20	17	ОП-4А	17	95
10	М40-20	60 – 80	НТФ-20	17	ОП-4А	17	95
11	М40-20 + ОКС	60 – 80	НТФ-20	17	ОП-4А	17	90
12	Ф14	60 – 80	АКВА-ИС-3	17	ОП-4А	17	85
13	Ф14 + ЭМК	60 – 80	АКВА-ИС-3	17	ОП-4А	17	85
14	Ф5	60 – 80	АКВА-ИС-3	17	ОП-4А	17	90
15	Ф5 + ЭМК	60 – 80	АКВА-ИС-3	17	ОП-4А	17	95
16	М40 + ОКС	60 – 80	АКВА-ИС-3	17	ОП-4А	17	100

Результатами контрольного опыта, приведенными в табл. 7, подтверждена эффективность разработанных реагентных режимов с использованием антискаланта и диспергатора. Как видно из данных табл. 7, применение антискаланта и диспергатора позволило повысить извлечение нефлотируемых алмазов с 0 до 80%, что подтверждает возможность восстановления гидрофобных свойств алмазов, поверхность которых покрыта гидрофилизирующими образованиями, и повышения эффективности действия собирателя за счет воздействия на него реагента-диспергатора ОП-4А.

Выводы

По результатам испытаний выполнена предварительная оценка эффективности комбинированных реагентных режимов в схеме опытной пенной сепарации алмазосодержащего материала с применением в определенной последовательности наиболее эффективных реагентов-собирателей и реагентов-регуляторов, установленных на этапах 1 и 2 настоящих исследований.

Результатами обработки полученных данных, выполненной специалистами института «Якутнипроалмаз», установлено:

1. В условиях применения стандартного режима пенной сепарации извлечение алмазов в концентрат опытной пенной сепарации составляет в среднем 58%.

2. На основании результатов экспериментальной апробации реагентов-собирателей разработанного состава, по-

лученных на основе мазута флотского Ф5 и мазута топочного М40 с применением в них исследуемых модифицирующих добавок, установлена эффективность новых реагентов: Ф14+ЭМК; М40+ОКС; М40-20; М40-20+ОКС, выражающаяся в повышении извлечения алмазов в концентрат на 5—17% (см. табл. 2).

3. На основании результатов экспериментальной апробации реагентов-диспергаторов в комплексе с базовым собирателем (Ф14) установлена максимальная эффективность применения диспергатора ОП-4А в виде повышения извлечения алмазов в концентрат опытной пенной сепарации на 37% по сравнению с базовым извлечением (58%) без использования диспергаторов (см. табл. 3).

4. На основании результатов экспериментальной апробации реагентов-диспергаторов в комплексе с модифицированными реагентами-собирателями подтверждена эффективность применения диспергатора ОП-4А — повышение извлечения алмазов в концентрат опытной пенной сепарации на 35—42% (см. табл. 4) в условиях использования всех модифицированных реагентов-собирателей, состав которых приведен в табл. 2.

5. На основании результатов экспериментальной апробации реагентов-антискалантов в комплексе с базовым собирателем (Ф14) установлена максимальная эффективность применения антискалантов НТФ-20 и АКВА-ИС-3 — повышение извлечения алмазов в концентрат опытной пенной сепарации на 12% по сравнению с базовым извлечением (58%) без использования антискалантов (см. табл. 5).

Полученные результаты рассмотрены на техническом совете АК «АЛРОСА» и приняты к опытной промышленной апробации в условиях обогатительных алмазоизвлекающих фабрик в составе реагентных режимов пенной сепарации, включающих:

- базовый реагент собиратель Ф14;
- модифицированные реагенты-собиратели (мазуты М40+ОКС, М40-20, М40-20+ОКС и Ф14+ЭМК);
- реагент-диспергатор ОП-4А;
- реагенты-антискаланты НТФ-20 и АКВА-ИС-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Злобин М. Н.* Состояние и некоторые пути развития технологии обогащения алмазосодержащих руд на предприятиях АК «АЛРОСА». — М.: Алмазы, 2002. — С. 59—63.

2. *Горячев Б. Е.* Технология алмазосодержащих руд. — М: МИСИС, 2010. — 326 с.

3. *Зинчук Н. Н.*, *Коптиль В. И.* Сравнительные особенности алмазов из коренных источников территорий с высокой плотностью расположения кимберлитовых тел // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023. — Т. 65. — № 1. — С. 28—42. DOI: 10.32454/0016-7762-2023-65-1-28-42.

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

5. *Коваленко Е. Г.* Совершенствование схемы и режима внутреннего водооборота пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2024. — Т. 30. — № 2. — С. 62—71.

6. *Островская Л. Ю.*, *Пашинин А. С.*, *Ральченко В. Г.*, *Бойнович Л. Б.*, *Ашкинази Е. Е.*, *Большаков А. П.* Смачивание низкоиндексных граней алмаза: динамические измерения // Журнал физической химии. — 2014. — Т. 88. — № 5. — С. 822—829. DOI: 10.7868/S0044453714050252.

7. *Чантурия В. А.*, *Двойченкова Г. П.*, *Трофимова Э. А.*, *Чаадаев А. С.*, *Зырянов И. В.*, *Островская Г. Х.* Современные методы интенсификации процессов обогащения и доводки алмазосодержащего сырья класса — 5 мм // Горный журнал. — 2011. — № 1. — С. 71—74.

8. *Чантурия В. А.*, *Двойченкова Г. П.*, *Чантурия Е. Л.*, *Тимофеев А. С.* Интенсификация процессов сепарации труднообогатимого алмазосодержащего сырья коренных, россыпных и техногенных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 5. — С. 95—108.

9. *Коваленко Е. Г.* Совершенствование схемы и режима внутреннего водооборота пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2024. — Т. 30. — № 2. — С. 62—71. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-62-71.

10. *Махрачев А. Ф.* Повышение эфективности реагентов-собирателей для флотации алмазов на основе виброструйной магнитной активации / Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XXIII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XVI Уральской горнопромышленной декады, 2018. — С. 122—125.

11. *Верхотурова В. А.*, *Елшин И. В.*, *Немаров А. А.* Научное обоснование и выбор оптимального варианта по восстановлению гидрофобных свойств поверхности алмазов из руды трубки «Интернациональная» // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2014. — № 8. — С. 51—56.

12. *Морозов В. В.*, *Коваленко Е. Г.*, *Двойченкова Г. П.*, *Пестряк И. В.*, *Лезова С. П.* Современные направления повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов // Горные науки и технологии. — 2024. — Т. 9. — № 2. — С. 134—145.

13. *Смольников В. А.*, *Бычкова Г. М.*, *Специус З. В.* Перспективные способы повышения флотируемости алмазов // Горный журнал. — 1999. — № 5. — С. 33—36.

14. *Кондратьев С. А.*, *Семьянова Д. В.* Связь структуры углеводородного радикала флотационного реагента с его собирательными свойствами // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 6. — С. 161—172.

15. *Пестряк И. В.*, *Лезова С. П.* Выбор и обоснование состава собирателя для процесса пенной сепарации алмазосодержащего сырья / Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья. Материалы XXVIII Международной научно-технической конференции, проводимой в рамках XXI Уральской горнопромышленной декады. — Екатеринбург, 2023. — С. 46—50.

16. *Черноусенко Е. В.*, *Нерадовский Ю. Н.*, *Каменева Ю. С.*, *Вишнякова И. Н.*, *Митрофанова Г. В.* Повышение эффективности флотационного обогащения труднообогатимых сульфидных медно-никелевых руд Печенгского рудного поля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 6. — С. 173—179.

17. *Chun-chen Nie, Xi-guang Li, Wen-tao Zhou, Haipei Dong, Xiang-nan Zhu* Innovative separation strategies for low-rank coal flotation: Filling self-generated pores with gutter oil collectors to enhance hydrophobic sites // Advanced Powder Technology. 2025, vol. 36, no. 6, article 104908. DOI: 10.1016/j.apt.2025.104908.

18. *Dongtao Tang, Lingyun Fei, Shuai Wang, Hong Zhong, Xin Ma, Zhanfang Cao* The selective adsorption mechanism of an amino acid surfactant in the flotation separation of fluorite from calcite // Chemical Engineering Science. 2025, vol. 311, article 121617. DOI: 10.1016/j.ces.2025.121617.

19. *Zhenchao Ma, Zhe Li, Yingying Wang, Mengdi Xu, Ying Zhou, Xuesong Yang, Lei Wang, Yaowen Xing, Bobo Zhou, Xiahui Gui* Synergistic collaboration of stirred mill and saline water to improve flotation decarburization efficiency of coal gasification fly ash // Minerals Engineering. 2025, vol. 229, article 109398. DOI: 10.1016/j.mineng.2025.109398.

20. *Lijun Liu, Gan Cheng, Wei Yu, Chao Yang* Flotation collector preparation and evaluation of oil shale // Oil Shale. 2018, vol. 35, no. 3, pp. 242—251. ГИАБ

REFERENCES

1. Zlobin M. N. *Sostoyanie i nekotorye puti razvitiya tekhnologii obogashcheniya almazosoderzhashchikh rud na predpriyatiyakh AK «ALROSA»* [Status and some development paths of diamond-bearing ore beneficiation technology at ALROSA enterprises], Moscow, Almazy, 2002, pp. 59—63.

2. Goryachev B. E. *Tekhnologiya almazosoderzhashchikh rud* [Technology of diamond-bearing ores], Moscow, MISIS, 2010, 326 p.

3. Zinchuk N. N., Koptil V. I. Comparative features of diamonds from primary sources of territories with a high density of kimberlite bodies. *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*. 2023, vol. 65, no. 1, pp. 28—42. [In Russ]. DOI: 10.32454/0016-7762-2023-65-1-28-42.

4. Zlobin M. N. Coarse-grain flotation technology for beneficiation of diamond-bearing ores. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 1, pp. 87—89. [In Russ].

5. Kovalenko E. G. Improving the scheme and mode of internal water circulation for foam separation of diamond-bearing kimberlites. *Transbaikal state university journal*. 2024, vol. 30, no. 2, pp. 62—71. [In Russ].

6. Ostrovskaya L. Yu., Pashinin A. S., Ralchenko V. G., Boynovich L. B., Ashkinazi E. E., Bolshakov A. P. Wetting of low-index diamond facets: dynamic measurements. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2014, vol. 88, no. 5, pp. 822—829. [In Russ]. DOI: 10.7868/S0044453714050252.

7. Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., Trofimova E. A., Chaadaev A. S., Zyryanov I. V., Ostrovskaya G. Kh. Modern methods of intensification of beneficiation processes and finishing of diamond-containing raw materials of class — 5 mm. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 1, pp. 71—74. [In Russ].

8. Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., Chanturia E. L., Timofeev A. S. Intensification of separation processes of difficult-to-dress diamond-containing raw materials of primary, placer and technogenic deposits. *Journal of Mining Sciences*. 2022, no. 5, pp. 95—108. [In Russ].

9. Kovalenko E. G. Improving the scheme and mode of internal water circulation for foam separation of diamond-bearing kimberlites. *Transbaikal state university journal*. 2024, vol. 30, no. 2, pp. 62—71. [In Russ]. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-2-62-71.

10. Makhrachev A. F. Improving the efficiency of reagents-collectors for diamond flotation based on vibratory jet magnetic activation. *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. Materialy XXIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, provodimoy v ramkakh XVI Ural'skoy gornopromyshlennoy dekady* [Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials. Proceedings of the XXIII International Scientific and Technical Conference held within the framework of the XVI Ural Mining Decade], 2018, pp. 122—125. [In Russ].

11. Verkhoturova V. A., Elshin I. V., Nemarov A. A. Scientific substantiation and selection of the optimal option for restoring the hydrophobic properties of the surface of diamonds from the ore of the «Internatsionalnaya» pipe. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014, no. 8, pp. 51—56. [In Russ].

12. Morozov V. V., Kovalenko E. G., Dvoichenkova G. P., Pestryak I. V., Lezova S. P. Modern directions for improving the efficiency of foam separation of diamond-bearing kimberlites. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, vol. 9, no. 2, pp. 134—145. [In Russ].

13. Smolnikov V. A., Bychkova G. M., Spetsius Z. V. Promising methods for increasing the floatability of diamonds. *Gornyi Zhurnal*. 1999, no. 5, pp. 33—36. [In Russ].

14. Kondratiev S. A., Semyonova D. V. Relationship between the structure of the hydrocarbon radical of the flotation reagent and its collecting properties. *Journal of Mining Sciences*. 2018, no. 6, pp. 161—172. [In Russ].

15. Pestryak I. V., Lezova S. P. Selection and justification of the composition of the collector for the process of foam separation of diamond-containing raw materials. Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syr'ya. *Materialy XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, provodimoy v ramkakh XXI Ural'skoy gornopromyshlennoy dekady* [Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials. Proceedings of the XXVIII International Scientific and Technical Conference, held within the framework of the XXI Ural Mining Decade], Ekaterinburg, 2023, pp. 46—50. [In Russ].

16. Chernousenko E. V., Neradovsky Yu. N., Kameneva Yu. S., Vishnyakova I. N., Mitrofanova G. V. Improving the efficiency of flotation beneficiation of refractory sulfide copper-nickel ores of the Pechenga ore field. *Journal of Mining Sciences*. 2018, no. 6, pp. 173—179. [In Russ].

17. Chun-chen Nie, Xi-guang Li, Wen-tao Zhou, Haipei Dong, Xiang-nan Zhu Innovative separation strategies for low-rank coal flotation: Filling self-generated pores with gutter oil collectors to enhance hydrophobic sites. *Advanced Powder Technology*. 2025, vol. 36, no. 6, article 104908. DOI: 10.1016/j.apt.2025.104908.

18. Dongtao Tang, Lingyun Fei, Shuai Wang, Hong Zhong, Xin Ma, Zhanfang Cao The selective adsorption mechanism of an amino acid surfactant in the flotation separation of fluorite from calcite. *Chemical Engineering Science*. 2025, vol. 311, article 121617. DOI: 10.1016/j.ces.2025.121617.

19. Zhenchao Ma, Zhe Li, Yingying Wang, Mengdi Xu, Ying Zhou, Xuesong Yang, Lei Wang, Yaowen Xing, Bobo Zhou, Xiahui Gui Synergistic collaboration of stirred mill and saline water to improve flotation decarburization efficiency of coal gasification fly ash. *Minerals Engineering*. 2025, vol. 229, article 109398. DOI: 10.1016/j.mineng.2025.109398.

20. Lijun Liu, Gan Cheng, Wei Yu, Chao Yang Flotation collector preparation and evaluation of oil shale. *Oil Shale*. 2018, vol. 35, no. 3, pp. 242—251.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чуть-Ды Валентина Анатольевна[1] — ведущий инженер,
e-mail: chutdyva@alrosa.ru,
Двойченкова Галина Петровна[2] — д-р техн. наук, доцент,
главный научный сотрудник;
профессор, Политехнический институт (филиал)
Северо-Восточного федерального университета
имени М.К. Аммосова, e-mail: dvoigp@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0940-3880,
Бабушкина Алена Леонидовна[1] — заведующий сектором,
e-mail: babushkinaal@alrosa.ru,
Масанов Алексей Юрьевич — руководитель направления
по внедрению инноваций, Центр инноваций и технологий,
АК «АЛРОСА» (ПАО), e-mail: MasanovAYu@alrosa.ru,
Тимофеев Александр Сергеевич[2] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: Timofeev_ac@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3382-6007,
[1] Научно-исследовательский и проектный институт алмазодобывающей
промышленности «Якутнипроалмаз», АК «АЛРОСА» (ПАО),
[2] Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН.
Для контактов: Двойченкова Г.П., e-mail: dvoigp@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Chut-Dy[1], Leading Engineer,
e-mail: chutdyva@alrosa.ru,
G.P. Dvoichenkova[2], Dr. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, Chief Researcher; Professor,
Polytechnic Institute (branch) of the North-Eastern
Federal University named after M.K. Ammosova,
678174, Mirny, Russia, e-mail: dvoigp@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0940-3880,
A.L. Babushkina[1], Head of Sector,
e-mail: babushkinaal@alrosa.ru,
A.Yu. Masanov, Task Leader to Innovation Adoption,
Center for Innovation and Technology,
AK ALROSA (PJSC), Moscow, Russia,
e-mail: MasanovAYu@alrosa.ru,
A.S. Timofeev[2], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: Timofeev_ac@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3382-6007,
[1] Research and Design Institute of the Diamond Mining Industry
«Yakutniproalmaz», AK ALROSA (PJSC), 678175, Mirny, Russia,
[2] Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources,
Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.
Corresponding author: G.P. Dvoichenkova, e-mail: dvoigp@mail.ru.

Получена редакцией 13.07.2025; получена после рецензии 15.08.2025; принята к печати 10.10.2025.
Received by the editors 13.07.2025; received after the review 15.08.2025; accepted for printing 10.10.2025.