

Научная статья

УДК 622.765.4

DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-1-51-62

Применение компаундных нефтесодержащих собирателей в процессе пенной сепарации алмазов

Евгений Геннадьевич Коваленко

Институт «Якутнипроалмаз», алмазодобывающая компания «АЛРОСА», г. Мирный, Россия
kovalenkoeg@alrosa.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию
11.11.2022

Одобрена после
рецензирования
14.11.2022

Принята к публикации
11.02.2023

Ключевые слова:

алмазы, кимберлиты,
собиратель, нефть,
мазут, фракционный
состав, парафины,
асфальтены, нефтяные
смолы, флотация, пенная
сепарация

Объектом настоящего исследования является процесс обогащения алмазосодержащих кимберлитов пенной сепарацией. *Предмет исследований* – компаундные собиратели для флотации алмазов. *Цель исследования* – обоснование возможности и выбор условий применения Маччобинской нефти в качестве компонента базового собирателя при пенной сепарации алмазов. *Задачи исследования*: установление физико-химических характеристик Маччобинской нефти, мазутов и их смесей; оценка их собирательной способности; выбор оптимального состава собирателя; определение эффективности применения компаундного собирателя в технологическом процессе. Для установления физико-химических характеристик Маччобинской нефти, мазутов и их смесей применены методы ректификационного анализа фракционного состава, визиометрического анализа структуры и фазового состава, вибрационной вискозиметрии. Для оценки собирательной способности компаундного собирателя применены методики флотации и пенной сепарации алмазов и минералов кимберлита на лабораторных установках беспенной флотации и пенной сепарации. Для определения эффективности компаундного собирателя применена автоматизированная установка пенной сепарации. Проведёнными физико-химическими исследованиями показано, что при смешивании мазута Ф-5 и дегазированной Маччобинской нефти наблюдается растворение асфальтенов мазута в низкомолекулярных фракциях нефти, а парафинов нефти – в среднемoleкулярных фракциях мазута. Протекающее при этом образование тонкодисперсных и коллоидных растворов высокомолекулярных компонентов нефти увеличивает адгезионную активность и приводит к увеличению собирательной способности компаундного собирателя. Флотационными исследованиями показано, что наибольшее извлечение алмазов в концентрат достигается при использовании в качестве базового собирателя смеси мазута Ф-5 и Маччобинской нефти при соотношении от 3:1 до 1:1. Проведёнными испытаниями при обогащении руды трубки «Айхал» пенной сепарацией установлено увеличение извлечения алмазов при использовании компаундного собирателя на 1,1–2,1 %. За счёт замены мазутной фракции на нефть также достигнуто сокращение затрат на реагенты.

Original article

Application of Compound Oil-Containing Collectors
in the Process of Foam Separation of Diamonds**Evgeny G. Kovalenko***Institut "Yakutniproalmaz", Diamond Mining Company "ALROSA", Mirny, Russia*

kovalenkoeg@alrosa.ru

Information about the articleReceived
November 11, 2022Approved after review
November 14, 2022Accepted for publication
February 11, 2023

The object of this study is the process of diamond-containing kimberlites' enrichment by foam separation. The subject of research is compound collectors for diamond flotation. The purpose of the study is to substantiate the possibility and choice of conditions for the use of Machchobin oil as a component of the base collector in the foam separation of diamonds. The objectives of the research are to establish the physico-chemical characteristics of Machchobin oil, fuel oil and their mixtures; assess their collecting ability; select the optimal composition of the collector; determine the effectiveness of a compound collector use in the technological process. The methods of rectification analysis of fractional composition, visimetric analysis of structure and phase composition, vibrational viscometry have been used to establish the physical and chemical characteristics of Machchobin oil, fuel oils and their mixtures. To estimate the collecting ability of the compound collector the methods of flotation and foam separation of diamonds and minerals of kimberlite on the laboratory installations of foamless flotation and foam separation have been applied. To determine the efficiency of the compound collector an automated foam separation unit has been used. Conducted physico-chemical studies have shown that when mixing fuel oil F-5 and degassed Machchobin oil, the dissolution of asphaltenes of fuel oil in low-molecular fractions of oil, and paraffins of oil – in medium-molecular fractions of fuel oil is observed. The formation of finely dispersed and colloidal solutions of high-molecular components of oil increases the adhesive activity and leads to an increase in the collecting capacity of the compound collector. The flotation studies have shown that the greatest extraction of diamonds into concentrate is achieved when using a mixture of fuel oil F-5 and Machchobin oil as a base collector at a ratio from 3:1 to 1:1. The tests carried out during the enrichment of the ore of the Aihal tube by foam separation have established an increase in diamond extraction using a compound collector by 1.1–2.1 %. By replacing the fuel oil fraction with oil, a reduction in reagent costs has also been achieved.

Keywords:

diamonds, kimberlites, collector, oil, fuel oil, fractional composition, paraffins, asphaltenes, petroleum resins, flotation, foam separation

Введение. Актуальность задачи применения компаундных нефтесодержащих собирателей обусловлена как необходимостью повышения извлечения мелких алмазов, так и требованиями к снижению расходов флотационных реагентов. Мелкие классы природных алмазов становятся всё более востребованным продуктом переработки алмазосодержащих кимберлитов. Природные технические алмазы используются как для изготовления инструментов для камнеобработки, обработки металлов, медицины, так и для изготовления бриллиантов (в том числе для часовой промышленности) и изготовления сувенирной продукции.

Основными переделами, обеспечивающими выпуск мелких классов алмазов, являются липкостная и пенная сепарация [10; 13]. За счёт увеличения производства на этих переделах достигнут рост производства технических алмазов в 2021 г. и отражены главные перспективы увеличения производства

технических алмазов на предприятиях алмазодобывающей компании «Алроса».

Важным ресурсом повышения эффективности пенной сепарации алмазов является оптимизация фракционного состава собирателей, в качестве которых традиционно используются различные нефтепродукты [1; 4]. При выборе фракционного состава собирателей решается задача как увеличения извлечения алмазов, так и сокращения затрат путём снижения расхода и стоимости реагентов [8]. Перспективным направлением решения поставленных задач является применение собирателей из сырья, производимого в том же регионе, таких как природная нефть и продукты её переработки.

Анализ современного состояния проблемы показал, что применение нефтесодержащих реагентов-собирателя для флотации апробировалось ранее для различных типов минерального сырья [3; 5]. Однако в случае применения сырой нефти и компаундов на её

основе, положительных результатов во всех случаях достичь не удавалось. Низкая стоимость нефти по сравнению с другими собирателями, а также её доступность в основных регионах переработки алмазосодержащего сырья делают актуальным проведение новых исследований, ставящих задачу определения возможности и условий использования нефти в качестве компонента применяемых собирателей.

Задача выбора и обоснования оптимального состава собирателей должна решаться одновременно с определением необходимого температурного режима пенной сепарации¹, что обусловлено существенной зависимостью физико-химических свойств нефтепродуктов от температуры. Для повышения эффективности пенной сепарации алмазосодержащего сырья в настоящей работе исследовались свойства и определялся оптимальный компонентный состав собирателей на основе мазутов и нефти с учётом температурных режимов основных операций технологического процесса.

Объектом настоящего исследования являлся процесс обогащения алмазосодержащих кимберлитов пенной сепарацией. *Предметом исследования* были компаундные собиратели для флотации алмазов. *Цель исследования* – обоснование возможности и выбор условий применения Маччобинской нефти в качестве компонента базового собирателя при пенной сепарации алмазов. *Задачи исследования:* установление физико-химических характеристик Маччобинской нефти, мазутов и их смесей; оценка их собирательной способности; выбор оптимального состава собирателя; определение эффективности применения компаундного собирателя в технологическом процессе.

Методология и методики исследования. Анализ фракционного состава мазутов и нефти проводился в сертифицированной лаборатории («Юго-западная лаборатория») с применением стандартных методик по ГОСТ Р 57036-2016. Исследование структуры применяемых в качестве собирателя нефтепродуктов осуществляли методом комбинированной оптической микроскопии в ультрафиолетовом и видимом диапазоне света

¹ Коваленко Е. Г. Выбор и оптимизация температурного режима процесса пенной сепарации кимберлитов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXVI Нац. науч.-техн. конф., проводимой в рамках XIX Уральской горнопромышленной декады (Екатеринбург, 26–27 мая 2021 г.). – Екатеринбург: Форт-Диалог-Исеть, 2021. – С. 63–68.

[12]. Снимки тонкого слоя нефтепродуктов получали на микроскопе Микромед-3-ЛЮМ. Визиометрический анализ и построение гранулометрических характеристик зёрен асфальтено-смолистых фракций проводился с использованием программного пакета ВидеоТест 4.0 [11].

Для измерения динамической вязкости реагентов-собирателей и их компонентов применялся вибрационный вискозиметр SV-10 [8].

Для проверки собирательных свойств исследуемых нефтепродуктов и их смесей использовалась установка беспенной флотации – трубка Халлимонта [9]. Подготовка алмазов для экспериментальных исследований предполагала химическую очистку их поверхности, которая включала отмывку в четырёххлористом углероде, спирте, дистиллированной воде и обработку в концентрированном растворе соляной кислоты. Полу-промышленные тесты на наилучших собирателях в выбранных температурных режимах проводились на установке пенной сепарации ЛФМ-001С в институте «Якутнипроалмаз» с использованием промышленной оборотной воды. Промышленная апробация разработанных реагентных режимов процесса пенной сепарации проводилась в отделении пенной сепарации обогатительной фабрики № 14 Айхальского ГОКа.

Основные результаты исследования и их обсуждение. Исследования физико-химических свойств нефти проводились после её предварительной подготовки. Нефть, добываемая из земных недр, содержит 50–100 м³ попутного газа [7; 14]. Для повышения технологических свойств нефти при её транспортировке проводят её дегазацию, в ходе которой удаляют газовую фазу и частично легкокипящие нефтяные фракции [6]. Дегазация и стабилизация нефти проводится в турбулентных потоках на комплексных установках в сочетании с обезвоживанием и обессоливанием.

Для исследований были подготовлены пробы исходной и дегазированной Маччобинской нефти. Дегазация проводилась в лабораторном вакуумном струйно-вихревом дегазаторе. Результаты измерений показали, что проба дегазированной Маччобинской нефти обладает повышенной вязкостью (в два раза выше, чем исходная нефть, табл. 1).

Свойства образцов нефти и компаундов с мазутом / Properties of oil samples and compounds with fuel oil

Название образца / Sample name	Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	T застывания, °C / T frozen, °C	Динамическая вязкость при 25 °C, мПа·с / Dynamic viscosity at 25 °C mPa s	Динамическая вязкость при 50 °C, мПа·с / Dynamic viscosity at 25 °C, mPa s
Флотский мазут Ф-5 / Fleet fuel oil F-5	943,5	-5	64,5	34,7
Маччобинская нефть исходная / Machchobin crude oil	857,4	-60	15,6	6,4
Маччобинская нефть после дегазации / Machchobin oil after degassing	875,3	-43	32,3	9,5
Компаунд мазута Ф-5 и нефти Маччобинская дегазированной 1:1 / Compound of fuel oil F5 and Machchobin degassed oil 1:1	923,3	-15	46,4	18,3

Показательно нарастание плотности и увеличение температуры застывания дегазированной нефти, свидетельствующие об протекающих изменениях в её составе. Смешивание дегазированной Маччобинской нефти с мазутом Ф-5 позволяет получить продукт со средними физико-химическими параметрами относительно смешиваемых компонентов (табл. 1).

Анализ фракционного состава (по данным анализов «Юго-западной лаборатории») показал, что массовая доля газов и легких фракций (с температурой дистилляции менее 300 °C) в дегазированной Мач-

чобинской нефти, заметно ниже (30 %), чем в исходной (37 %, рис. 1). Компаунд Маччобинской нефти с мазутом Ф-5 характеризуется средними параметрами фракционного состава относительно смешиваемых компонентов (рис. 1).

Анализ данных визиометрии показал, что мазут и нефть Маччобинская существенно отличаются по строению и фракционному составу. Мазут Ф-5 представлен равномерной по составу жидкой фазой средних и легких дистиллятов и кристаллов асфальтенов и нефтяных смол, ограничено растворимых в дистиллятах (рис. 2а).

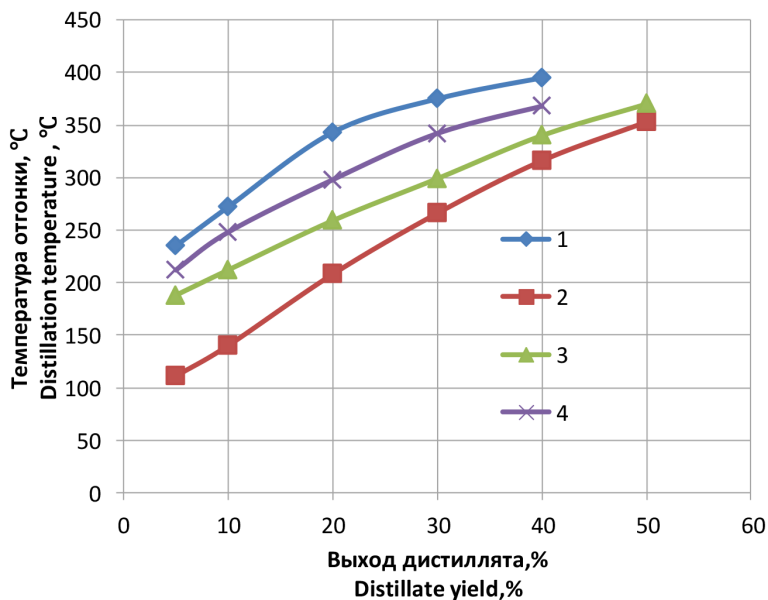


Рис. 1. Характеристики фракционного состава исследуемых проб нефти и компаундов по ГОСТ Р 57036-2016: 1 – Мазут Ф-5; 2 – Нефть Маччобинская; 3 – Нефть Маччобинская дегазированная; 4 – Смесь мазута Ф-5 и Маччобинской дегазированной нефти / **Fig. 1.** Characteristics of the fractional composition of the studied oil samples and compounds according to GOST R 57036-2016: 1 – Fuel oil F-5; 2 – Machchobin oil; 3 – Machchobin degassed oil; 4 – Mixture of fuel oil F-5 and Machchobin degassed oil

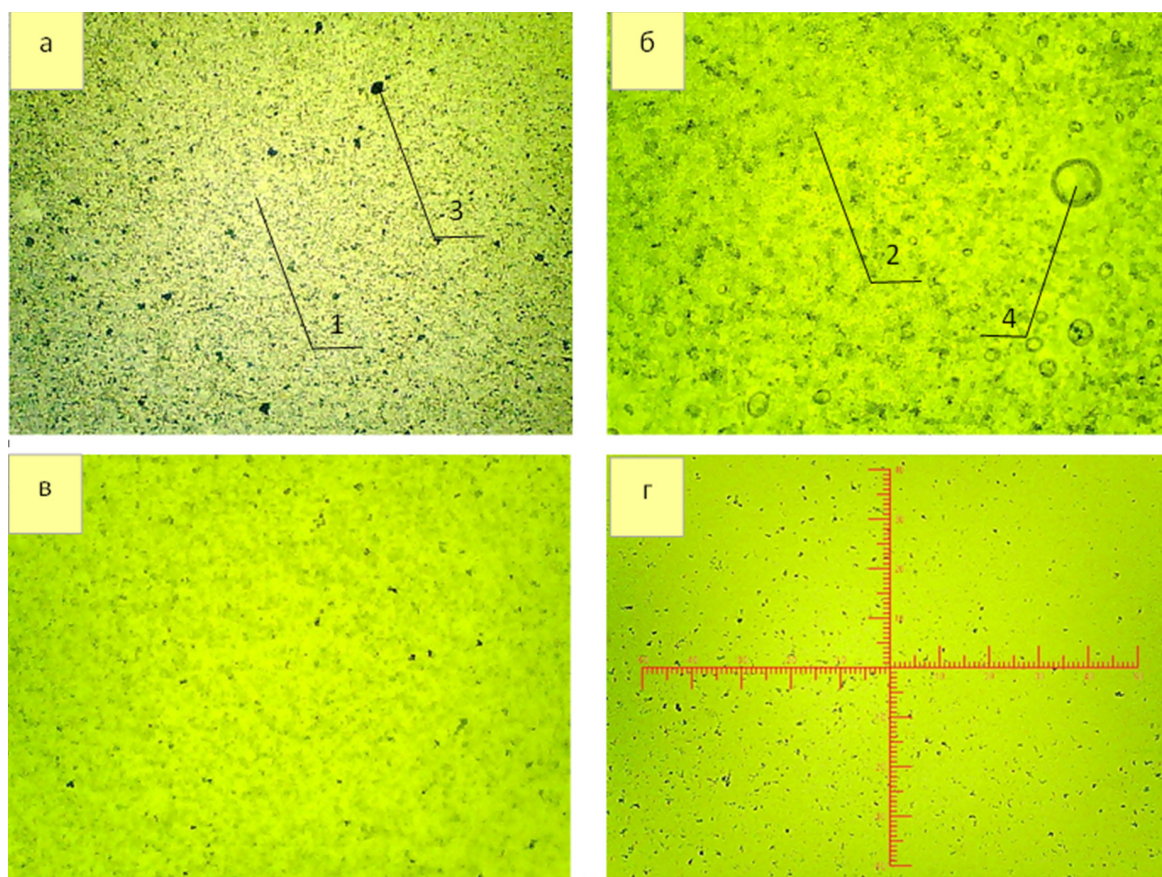


Рис. 2. Снимки тонкого слоя мазута Ф-5 (а), Маччобинской нефти до (б) и после отстаивания и дегазации (в), компаунда мазута Ф-5 и Маччобинской нефти (г) на микроскопе Микромед-3-ЛЮМ. 1 – низкомолекулярные углеводороды, 2 – кристаллы насыщенных углеводородов (парафинов); 3 – зерна асфальтено-смолистых фракций, 4 – капли водной фазы / **Fig. 2.** Images of a thin layer of fuel oil F-5 (a), Machchobin oil before (b) and after settling and degassing (c), a compound of fuel oil F5 and Machchobin oil (d) on a Micromed-3-LUM microscope. 1 – low molecular weight hydrocarbons, 2 – crystals of saturated hydrocarbons (paraffins); 3 – grains of asphaltene-resinous fractions, 4 – drops of the aqueous phase

Добытая Маччобинская нефть состоит из фракций средних и лёгких дистиллятов, не растворившихся в них парафинов и в небольшом количестве кристаллов асфальтенов и нефтяных смол. В нефти наблюдаются капли водной фазы (рис. 2б). После проведения операций отстаивания и дегазации строение и состав нефти не изменяется, происходит удаление капель водной фазы (рис. 2в).

После смешивания мазута и дегазированной нефти (рис. 2г) наблюдается уменьшение массовой доли асфальтенов и парафинов. Такие изменения связаны с растворением асфальтенов в низкомолекулярных фракциях нефти, а парафинов – в среднемолекулярных фракциях мазута. Для получения количественных характеристик изменения фракционного состава нефтепродуктов при смешивании была использована программа для анализа изображений [11], позволяющая

оценить объёмную долю асфальтенов и нефтяных смол, а так же парафинов в нерастворённом состоянии. Анализ полученных результатов, приведённых в табл. 2, показал, что при смешивании мазута и нефти происходит взаимное растворение фракций, о чём говорит снижение объёмных концентраций асфальтено-смолистой фракции (АСФ), а так же парафинов относительно значений, рассчитываемых как средневзвешенные, при отсутствии взаимодействия указанных компонентов при смешивании.

Адгезионная активность реагента увеличивается за счёт процессов образования тонкодисперсных и коллоидных растворов, протекающих одновременно с процессом взаиморастворения различных фракций [15; 16]. Такие изменения дают основания ожидать высоких собирательных свойств компаундов на основе мазута Ф-5 и Маччобинской нефти.

Изменение массовых долей компонентов в мазуте, нефти и продуктах их смешивания в соотношении 1:1 при 24 °С / Change in the mass fractions of components in fuel oil, oil and their mixing products in a ratio of 1:1 at 24 °С

Нефтепродукты / Petroleum products	Массовая доля фракций, % / Mass proportion of fractions, %			
	Парафины / Paraffins	АСФ / ASF	Низкомолекулярные компоненты / Low molecular weight components	Итого / Total
Мазут Ф-5 / Fuel oil F-5	6,4	24,0	69,6	100,0
Нефть Маччобинская / Machchobin Oil	18,6	6,2	75,2	100,0
Смесь 1:1 расчетная / Mixture 1:1 calculated	12,5	15,1	72,4	100,0
Смесь 1:1 измеренная / Mixture 1:1 measured	2,5	9,2	88,3	100,0

Проверка собирательных свойств мазутов и компаундов Маччобинской нефти проводилась на установке беспенной флотации – трубке Халлимонта. Флотационные опыты выполнены в три серии при значениях температур водной среды: 10, 14 и 24 °С. При флотации использовалась навеска алмазов крупностью от 0,45 до 1 мм массой 200 мг. Расход собирателя составлял 5,5 мг. Время флотации составлял 4 мин, расход воздуха – 50 мл. При агитации алмазов собиратель использовался в виде эмульсии в

водной фазе (объем водной фазы – 40 мл). В объем водной фазы также добавляли полифосфат натрия.

Анализ результатов флотационных опытов показал следующее. При 10 и 14 °С наилучшие результаты получены для компаундов Маччобинской нефти и мазута Ф-5 при соотношении от 1:1 до 1:2 (табл. 3). Извлечение алмазов при использовании компаунда Маччобинской нефти и мазута Ф-5 выше, чем при использовании исходного мазута Ф-5.

Таблица 3 / Table 3

Данные по флотации алмазов с использованием в качестве собирателей мазута флотского Ф-5, Маччобинской нефти и компаундов на их основе / Data on the flotation of diamonds using F5 naval fuel oil, Machchobin oil and compounds based on them as collectors

Температура, °С / Temperature, °С	10	14	24
Собиратель / Collector	Извлечение, % / Recovery, %		
Флотский мазут Ф-5 / Naval fuel oil F-5	69,5	74,6	80,5
Нефть Маччобинская исходная / Machchobin source oil	60,2	62,8	66,8
Нефть Маччобинская дегазированная / Machchobin degassed oil	63,2	72,6	74,7
Компаунд мазута Ф-5 и нефти Маччобинская дегазированной 3:1 / Compound of fuel oil F5 and Machchobin degassed oil 3:1	71,4	73,6	80,1
Компаунд мазута Ф-5 и нефти Маччобинская дегазированной 2:1 / Compound of fuel oil F-5 and Machchobin degassed oil 2:1	71,1	74,2	81,1
Компаунд мазута Ф-5 и нефти Маччобинская дегазированной 1:1 / Compound of fuel oil F-5 and Machchobin degassed oil 1:1	71,2	75,3	80,0
Компаунд мазута Ф-5 и нефти Маччобинская дегазированной 1:2 / Compound of fuel oil F-5 and Machchobin degassed oil 1:2	70,3	74,1	78,6
Компаунд мазута Ф-5 и нефти Маччобинская дегазированной 1:3 / Compound of fuel oil F-5 and Machchobin degassed oil 1:3	67,1	73,1	76,3

Собирательные свойства исходной нефти Маччобинской в интервале температур 10–14 °С заметно ниже, чем у смесей мазута флотского Ф-5 с дизельной фракцией (извлечение в концентрат 60,2–62,8 %). Дегазация повышает собирательные свойства нефти (повышение извлечения на 3,0–9,8 %). Из-

влечение алмазов при температуре 14 °С приближается к значению, достигнутому при флотации мазутом Ф-5.

В условиях проведения флотационных опытов при 24 °С наблюдается повышение извлечения алмазов в среднем на 3–5 % (табл. 3). Наилучшие результаты получены

для мазута Ф-5 и Маччобинской нефти и мазута Ф-5 при соотношении от 3:1 до 1:1 (извлечение 80,1–81,1 %).

Дальнейшие исследования, проведённые на установке пенной сепарации ЛФМ-001С, ставили задачей определение оптимального соотношения между мазутом Ф-5 и Маччобинской нефтью в условиях, максимально приближенных к реальному техно-

логическому процессу. Выбранные расходы основного собирателя (1000 г/т), аэрофлота (15 г/т), полифосфата натрия (150 г/т) и вспенивателя (80 г/т) обеспечивали селективное протекание процесса пенной сепарации с извлечением алмазов на уровне 85 % при выходе минералов кимберлита в концентрат 1,5 % (табл. 4, опыт с мазутом Ф-5).

Таблица 4 / Table 4

Данные по флотации алмазов с использованием в качестве собирателей мазута флотского Ф-5, Маччобинской нефти и компаундов на их основе / Data on the flotation of diamonds using F-5 naval fuel oil, Machchobin oil and compounds based on them as collectors

Собиратель / Collector	Извлечение, % / Recovery, %		
	Алмазов / Diamond	Кимберлита / Kimberlite	Показатель селективности / Selectivity index
Флотский мазут Ф-5 / Fleet fuel oil F-5	84,5	1,5	82,55
Компаунд мазута Ф-5 и нефти Маччобинской дегазированной 3:1 / Compound of fuel oil F-5 and Machchobin degassed oil 3:1	85,1	1,8	82,76
Компаунд мазута Ф-5 и нефти Маччобинской дегазированной 2:1 / Compound of fuel oil F-5 and Machchobin degassed oil 2:1	86,8	1,9	84,33
Компаунд мазута Ф-5 и нефти Маччобинской дегазированной 1:1 / Compound of fuel oil F-5 and Machchobin degassed oil 1:1	87,5	1,9	85,03

Полученные результаты флотационных опытов с использованием в качестве собирателей мазута флотского Ф-5, компаундов на его основе с Маччобинской нефтью позволяют вывод, что компаунды мазута флотского Ф-5 с Маччобинской нефтью обладают хорошими собирательными свойствами. Извлечение алмазов при соотношении мазута и нефти от 3:1 до 1:1 превышает или соответствует извлечению при применении исходного мазута Ф-5. Полученные результаты послужили основанием для проведения промышленных испытаний выбранного реагентного режима, предусматривающего использование в качестве основного собирателя компаунда Маччобинской нефти и мазута Ф-5. Учитывая полученные на установке пенной сепарации результаты, в качестве собирателя был использован компаунд мазута Ф-5 и нефти Маччобинская дегазированной при соотношении 1:1.

Промышленная апробация реагентного режима пенной сепарации проводилась на обогатительной фабрике № 14 Айхальского ГОКа. Технологическая схема пенной сепарации включает подготовительные операции обесшламливания исходного питания и его кондиционирования с реагентами (рис. 2).

Исходный материал крупностью – 1,2 мм последовательно проходит через обесшлам-

ливающую воронку (1) и обезвоживающий грохот (2). Подрешетный материал крупностью –0,5 мм направляется в отвал, а надрешетный материал крупностью +0,5 мм поступает на классификатор (3) для дальнейшего обезвоживания. Слив классификатора направляется в циркуляцию, пески направляются в кондиционер (4) для перемешивания с реагентами. Из кондиционера материал поступает на основную стадию пенной сепарации во флотационную машину ПФМ-5М (5). Хвосты основной пенной сепарации направляются на обезвоживание в классификатор (6). Сливы классификатора направляются на осветление и далее в водооборот. Пески классификатора поступают на контрольную стадию пенной сепарации, проводимую на флотационной машины ПФМ-5М (7). Хвосты контрольной стадии пенной сепарации направляются в хвостовой зумпф. Концентраты основной и контрольной сепарации собираются в зумпфе (8), откуда насосом подаются на предварительное обезвоживание в гидроциклон (9). Слив гидроциклонов поступает на осветление и далее в водооборот. Пески гидроциклонов направляются на обезвоживающий грохот (10), кондиционер (11) и далее на перечистку в пенный сепаратор ПС-04 (12). Хвосты сепаратора подаются на пром-

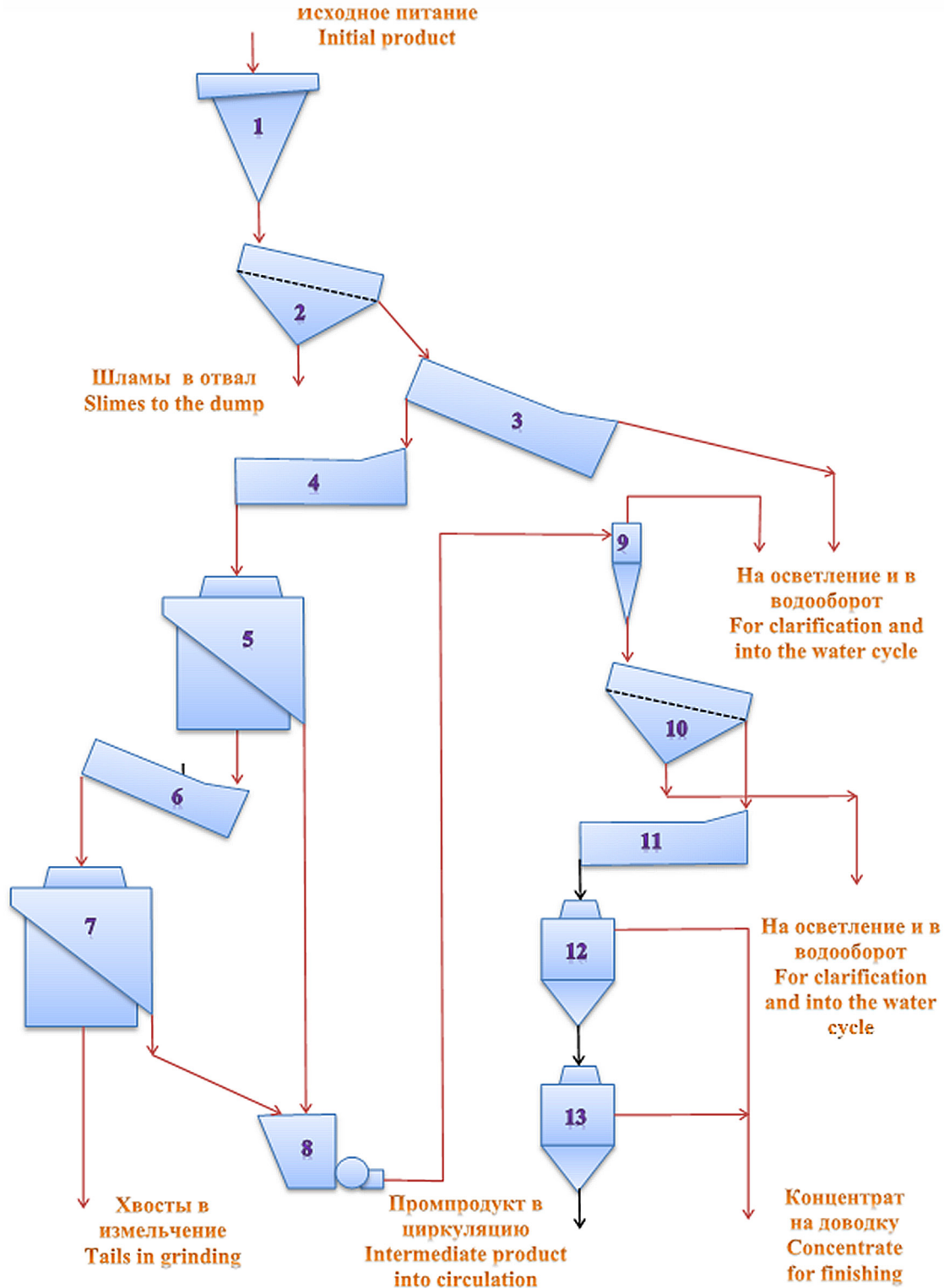


Рис. 3. Схема цепи аппаратов основного и перечистного цикла пенной separации: 1 – обесшламливающая воронка; 2,10 – обезвоживающий грохот; 3 – спиральный классификатор; 4, 11 – кондиционер; 5, 7 – флотационная машина ПФМ-5М; 6 – спиральный классификатор; 8 – зумпф; 9 – гидроциклон; 12, 13 – пенный сепаратор ПС-04 / **Fig. 3.** Flowsheet of the apparatus of the main and cleaning cycle of foam separation. 1 – desliming funnel; 2, 10 – dewatering screen; 3 – spiral classifier; 4, 11 – air conditioner; 5, 7 – flotation machine PFM-5M; 6 – spiral classifier; 8 – settling tank; 9 – hydrocyclone; 12, 13 – foam separator PS-04

продуктовый сепаратор ПС-04 (13). Хвосты промпродуктового сепаратора подаются в циркуляцию. Концентраты пенных сепараторов объединяются и направляются на участок доводки.

В процессе пенной сепарации в качестве основного реагента-собираателя применялся компаунд мазута марки Ф-5 и Маччобинской нефти. В качестве дополнительного собирателя со вспенивающими свойствами применялся аэрофлот натриево-бутиловый марки ИМА 1012А. В качестве вспенивателя использовали ОПСБ. Вспениватель подавался в зумпф оборотной воды передела пенной сепарации и в камеры каждой из ПФМ-5М для локальной настройки плотности аэрированной пульпы. Для улучшения отделения шламов применяли полифосфат натрия, который подавался в кондиционер.

Циркуляция оборотной воды, насыщенной реагентами, происходит из сливов концентратных и хвостовых гидроциклонов. Сливы гидроциклонов проходят осветление в двух отдельных флотогравитационных осветлителях ОФГ-1,1 и ОФГ-1,6. Слив двух осветлителей направляется в зумпф оборотной воды пенной сепарации и возвращается обратно в процесс пенной сепарации. Промпродукт осветлителей направляется на обезвоживание перед контрольной стадией пенной сепарации на ПФМ-5М. Песковый продукт хвостового осветлителя направляется в циркуляцию фабрики, далее на обезвоживание перед контрольной стадией пенной сепарации на ПФМ-5М.

Испытания выбранного реагентного режима проводились на шихте руды трубки «Айхал»

с более бедным по содержанию сырьём трубки «Юбилейная» в соотношении 40:60. Перед началом проведения испытаний были выполнены настройки водно-шламовой схемы и технологической схемы пенной сепарации.

Во время проведения испытаний в процессе пенной сепарации в качестве основного реагента подавалась смесь мазута флотского Ф-5 и дегазированной нефти Маччобинского месторождения в соотношении 50:50. Подача вспомогательных флотационных реагентов аэрофлота, ОПСБ и полифосфата натрия корректировалась по мере необходимости.

Подача воздуха и оборотной воды на флотационные машины и пенные сепараторы находились в пределах технологических норм. Подача смеси мазута и нефти, аэрофлота и полифосфата натрия осуществлялась в кондиционер перед основной флотацией. Главным изменяемым параметром являлся расход основного реагента-собираателя.

При выполнении каждого этапа контролировались плотность и перелив на основной и контрольной ПФМ-5М, расход и точность подачи всех реагентов, давление воды и воздуха в ПГА и БПГА, давление в гидроциклонах, уровень перелива на ОФГ-1,6 и ОФГ-1,1, уровни в зумпфах, выход концентрата в цех доводки. После достижения устойчивого режима проводилось технологическое опробование.

Результаты, представленные в табл. 5, показали, что применение компаундного собирателя выбранного состава обеспечивает высокое извлечение алмазов, равное или превышающее соответствующее значение для реагентного режима, предусматривающего использование мазута Ф-5.

Таблица 5 / Table 5

Основные показатели работы передела пенной сепарации при разной дозировке смеси мазута Ф-5 и Маччобинской нефти / The main indicators of the work of the conversion of foam separation at different dosages of a mixture of fuel oil F5 and Machchobin oil

Расход собирателя, г/м / Collector consumption, g/t	Расход аэрофлота, г/м / Aeroflot consumption, g/t	Расход полифосфата натрия, г/м / Consumption of sodium polyphosphate, g/t	Производительность, т/ч / Productivity, t/h	Извлечение алмазов, % / Diamond recovery, %
Мазут Ф-5 / Fuel oil F-5				
1000	15	350	14,2	95,5
Мазут Ф-5 +Маччобинская нефть, 1:1 / Fuel oil F-5 +Machchobin oil, 1:1				
500	12	500	15,1	94,8
800	15	500	13,6	96,6
1000	15	500	13,9	97,6

Рекомендованные по результатам этих работ реагент-собираТЕЛЬ и выбранный режим пенной сепарации были использованы в дальнейшем при проведении процесса пенной сепарации алмазов на обогатительной фабрике № 14 Айхальского ГОКа, где подтвердил свою эффективность. При промышленном использовании реагента удалось также сократить расходы на реагенты на 14 %.

Выводы. В проведенных исследованиях показано, что смешивание природной нефти после операций сепарации и дегазации с мазутом позволяет получить компаундный реагент с измененной структурой и высокой собирательной способностью применительно к процессу флотации природных алмазов. На

основании испытаний обосновано применение в качестве базового собирателя в операции пенной сепарации алмазов смеси мазута флотского Ф-5 и дегазированной нефти Маччобинского месторождения в соотношении 1:1. Оптимальный реагентный режим предусматривает расход компаундного собирателя (смеси мазута и нефти) 800–1000 г/т; бутилового аэрофлота – 12–15 г/т; полифосфата натрия – 500 г/т. Подобранный оптимальный реагентный режим пенной сепарации апробирован при переработке руды трубки «Айхал» в шихте с рудой трубки «Юбилейная», где показал возрастание извлечения алмазов на 1,1–2,1 %. Разработанный режим повышает эффективность обогащения также за счет снижения затрат на реагенты.

Список литературы

1. Алексеенко В. В., Воронов Д. В., Каташевцев М. Д., Пахомовский А. Н. Исследование гранулометрического состава эмульсий с помощью оптического микроскопа и методом автоматизированного распознавания объектов на цифровой фотографии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 2. С. 99–104.
2. Бахметьев В. В., Сычев М. М. Исследование микроструктуры сплавов с использованием компьютерной программы «ВИДЕОТЕСТ». СПб.: СПбГТИ, 2011. 17 с.
3. Демиденко А. И., Летопольский А. Б., Геракин Н. И. Основы процесса дегазации нефти при промышленной подготовке // Наука и общество в условиях глобализации. 2019. № 1. С. 36–40.
4. Злобин М. Н. Технология крупнозернистой флотации при обогащении алмазосодержащих руд // Горный журнал. 2011. № 1. С. 87–89.
5. Кааров Ж. З. Повышение эффективности разработки Маччобинского нефтегазоконденсатного месторождения с использованием технологии “fishbone” // COLLOQUIUM–JOURNAL. 2019. № 13. С. 130–132.
6. Махрачев А. Ф., Двойченкова Г. П., Лезова С. П. Исследование и оптимизация состава компаундных собирателей для пенной сепарации алмазов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 11. С. 178–185.
7. Морозов В. В., Лезова С. П. Применение комбинированных собирателей на основе нефтепродуктов для пенной сепарации алмазосодержащих кимберлитов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 12. С. 137–146.
8. 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.
9. Опыт измерения вязкости нефтепродуктов с помощью синусоидального вибровязкозиметра SV-10 A&D Company, Ltd (Япония). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-izmereniya-vyazkosti-nefteproduktov-s-pomoschyu-sinusoidalnogo-vibrovizkozimetra-sv-10-a-d-company-ltd-yaponiya/viewer> (дата обращения: 21.10.2022). Текст: электронный.
10. Полежаева Н. И. Физико-химия нефтяных дисперсных систем. Термодинамика и кинетика фазовых переходов в нефтяных дисперсных системах. Красноярск: СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. 94 с.
11. Чантурия В. А. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения // Горный журнал. 2017. № 7. С. 29–37. DOI:10.17580/gzh.2015.07.05.
12. Чантурия В. А., Двойченкова Г. П., Бунин И. Ж., Миненко В. Г., Коваленко Е. Г., Подкаменный Ю. А. Комбинированные процессы извлечения алмазов из метасоматически измененных кимберлитовых пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 2. С. 117–127.
13. Kasomo R. M., Ombiro S., Rop B., Mutua N. M. Investigation and Comparison of Emulsified Diesel Oil and Flomin C 9202 as a Collector in the Beneficiation of Ultra-Fine Coal by Agglo-Flotation // International Journal of Oil, Gas and Coal Engineering. 2018. Vol. 6, no. 4. P. 74–80. DOI:10.11648/j.ogce.20180604.15.
14. Lijun Liu, Gan Cheng, Wei Yu, Chao Yang Flotation collector preparation and evaluation of oil shale // Oil Shale. 2018. Vol. 35, no. 3. P. 242–251. DOI:10.3176/oil.2018.3.04.

15. Murtada Mohammed Abdulredha, Siti Aslina Hussain., Luqman Chuah Abdullah // *Arabian Journal of Chemistry*. 2019. No. 13. P. 3403–3428. DOI: 10.1016/j.arabjc.2018.11.014.
16. Tukhvatullina A. Z., Kuryakov V. *Supramolecular Structures of Oil Systems as the Key to Regulation of Oil Behavior // Petroleum & Environmental Biotechnology*. 2013. Vol. 4, iss. 4. P. 1–8. DOI:10.4172/2157-7463.100 0152.

References

1. Alekseenko V. V., Voronov D. V., Katashevstev M. D., Pakhomovsky A. N. Investigation of the granulometric composition of emulsions using an optical microscope and the method of automated recognition of objects in digital photography. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*, no. 2, pp. 99–104, 2015. (In Rus.).
2. Bakhmetyev V. V., Sychev M. M. Investigation of the microstructure of alloys using the computer program "VIDEOTEST". Saint Petersburg: St. Petersburg Institute of Technology, 2011. (In Rus.).
3. Demidenko A. I., Letopolsky A. B., Gerakin N. I. Fundamentals of the process of oil degassing during field preparation. *Science and society in the conditions of globalization*, no. 1, pp. 36–40, 2019. (In Rus.).
4. Zlobin M. N. Technology of coarse-grained flotation in the enrichment of diamond-bearing ores. *Mining Journal*, no. 1, pp. 87–89, 2011. (In Rus.).
5. Kaarov Zh. Z. Improving the efficiency of the development of the Machchobinsky oil and gas condensate field using the Fish Bone technology. *COLLOQUIUM–JOURNAL*, no. 13, pp. 130–132, 2019. (In Rus.).
6. Makhrachev A. F., Dvoichenkova G. P., Lezova S. P. Research and optimization of the composition of compound collectors for foam separation of diamonds. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, no. 11, pp. 178–185, 2018. (In Rus.).
7. Morozov V. V., Lezova S. P. Application of combined collectors based on petroleum products for foam separation of diamond-containing kimberlites. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, no. 12, pp. 137–146, 2020. (In Rus.).
8. Morozov V., Pestryak I. V., Kovalenko E. G., Lezova S. P., In Polivanskaya V. Improving the efficiency of foam separation of diamonds on the basis of optimizing the composition of the collector and the temperature regime. *Mining Information and Analytical Bulletin*, no. 8, pp. 135–147, 2022. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_8_0_135. (In Rus.).
9. Experience in measuring the viscosity of petroleum products using a sinusoidal vibration meter SV-10 A&D Company, Ltd (Japan). Web. 21.10.2022. <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-izmereniya-vyazkosti-nefteproduktov-s-pomoschyu-sinusoidalnogo-vibroviskozimetra-sv-10-a-d-company-ltd-yaponiya/viewer>. (In Rus.).
10. Polezhaeva N. I. Physico-chemistry of petroleum dispersed systems. Thermodynamics and kinetics of phase transitions in petroleum dispersed systems. Krasnoyarsk: SibGU named after M. F. Reshetnev, 2021. (In Rus.).
11. Chanturia V. A. Innovative processes of complex and deep processing of mineral raw materials of natural and man-made origin. *Mining Journal*, no. 7, pp. 29–37, 2017. DOI: 10.17580/gzh.2015.07.05. (In Rus.).
12. Chanturia V. A., Dvoichenkova G. P., Bunin I. Zh., Minenko V. G., Kovalenko E. G., Podkamenny Yu. A. Combined processes of diamond extraction from metasomatically altered kimberlite rocks. *Physico-technical problems of mineral development*, no. 2, pp. 117–127, 2017. (In Rus.).
13. Kasomo R. M., Ombiro S., Rop B., Mutua N. M. Research and comparison of emulsified diesel fuel and Flomin C 9202 as a collector in the enrichment of ultrathin coal by sintering. *International Journal of Petroleum, Gas and Coal Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 74–80, 2018. DOI:10.11648/j.ogce.20180604.15. (In Eng.).
14. Lijun Liu, Gang Cheng, Wei Yu, Chao Yang Preparation of the flotation collector and assessment of oil shale. *Oil shale*, vol. 35, no. 3, pp. 242–251, 2018. DOI:10.3176/oil.2018.3.04. (In Eng.).
15. Murtada Mohammed Abdulredha, Siti Aslina Hussein, Lukman Chua Abdullah. *Arabic Chemical Journal*, no. 13, pp. 3403–3428, 2019. DOI: 10.1016/j.arabjc.2018.11.014. (In Eng.).
16. Tukhvatullina A. Z., Kuryakov V. Supramolecular structures of oil systems as a key to regulating the behavior of oil. *Oil and environmental biotechnology*, vol. 4, iss. 4, pp. 1–8, 2013. DOI: 10.4172/2157-7463.100 0152. (In Eng.).

Информация об авторе

Коваленко Евгений Геннадьевич, канд. техн. наук, главный инженер института «Якутнипроалмаз», алмазодобывающая компания «АЛРОСА», Республика Саха (Якутия), г. Мирный; доцент Политехнического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета имени М. К. Аммосова, г. Мирный, Россия; kovalenkoe@alrosa.ru, kovalenkoe@gmail.ru. Область научных интересов: исследование, моделирование и разработка технологий обогащения алмазосодержащих кимберлитов.

Information about the author

Kovalenko, Evgeny G., candidate of technical sciences, chief engineer, Institute «Yakutniproalmaz», Diamond Mining Company «ALROSA», Republic of Sakha (Yakutia); kovalenkoeg@alrosa.ru, kovalenkoeg@gmail.ru; associate Professor, Polytechnic Institute (branch) North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov; Research interests: Research, modeling and development of technologies for the enrichment of diamond-containing kimberlites.

Для цитирования

Коваленко Е. Г. Применение компаундных нефтесодержащих собирателей в процессе пенной сепарации алмазов // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 1. С. 51–62. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-1-51-62.

For citation

Kovalenko E. G. Application of compound oil-containing collectors in the process of foam separation of diamonds // Transbaikal State University Journal. 2023. Vol. 29, no. 1. Pp. 51–62. DOI: 10.21209/2227-9245-2023-29-1-51-62.