

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МИНЕРАЛЬНЫХ МАСЕЛ

© В. И. Жолнеркевич, Е. И. Грушова, А. А. Аль-Разуки, Ю. А. Горашук

¹ Белорусский государственный технологический университет,
220006, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, д. 13а
E-mail: zholnerkevichv@mail.ru

Поступила в Редакцию 27 мая 2022 г.

После доработки 16 января 2023 г.

Принята к публикации 24 января 2023 г.

Рассмотрены технологические приемы, позволяющие интенсифицировать основные экстракционные процессы многостадийного производства базовых масел из нефтяного сырья, в том числе использование на стадии селективной очистки масляных дистиллятов в качестве экстрагента N-метилпирролидона, содержащего 10 мас% триэтиленгликоля; на стадии низкотемпературной депарафинизации в качестве базового компонента растворителя изопропилового спирта; на стадии экстракционной очистки от канцерогенных соединений ароматических экстрактов, используемых в составах мягчителей и пластификаторов для резинотехнической и шинной промышленности, для активации сырья экстракции энергии сверхвысокочастотного электромагнитного поля. Показано, что реализация перечисленных приемов позволяет увеличить выход базового масла (на стадии селективной очистки на 9.5 мас%, на стадии низкотемпературной депарафинизации на 2.1 мас%), а также повысить качество вырабатываемых нефтепродуктов (на стадии селективной очистки снижается анилиновая точка, условное отношение ароматических структур к парафиновым структурам, на стадии низкотемпературной депарафинизации снижается вязкостно-температурная характеристика, показатель преломления).

Ключевые слова: жидкостная экстракция; рафинат; депарафинизация; экстракт; СВЧ-облучение; масло-пластификатор

DOI: 10.31857/S0044461822090031; EDN: PRGCSJ

Широкое внедрение комплексов углубленной переработки нефти, ужесточение экологических требований к процессам нефтеперерабатывающих производств предопределяет не только строительство новых установок, но и усовершенствование действующих технологических процессов переработки нефтяного сырья. Масла являются одним из основных продуктов переработки нефти. При получении масел с индексом вязкости выше 100 одной из значимых стадий производства масел являются экстракционные процессы, а также их сочетания с процессами гидрооблагораживания, гидрокрекинга [1, 2]. Ежегодно путем экстракции получают около 40 млн т масел. Экстракционные процессы включают селективную очистку масел различного назначения от соединений с низким индексом вязкости, обладающих токсичными и канцерогенными свойствами, экстрактивную

деасфальтизацию, экстракционную кристаллизацию, обезмасливание концентратов парафиновых углеводородов, т. е. гачей или петролатума (рис. 1). В связи с этим выявление оптимальных условий экстракции для улучшения качества и выхода нефтяных масел имеет важное значение в многостадийном масляном производстве.

Цель исследования — разработка способов совершенствования экстракционной технологии производства минеральных масел на стадиях селективной очистки масляного сырья, низкотемпературной депарафинизации рафинатов и очистки ароматических экстрактов — сырья для получения масел-пластификаторов от токсичных и канцерогенных соединений для снижения потерь масляного сырья и улучшения качества базового масла, а также ароматического технологического масла.

Экспериментальная часть

Для достижения поставленной цели были использованы технологические приемы, обеспечивающие интенсификацию экстракционных процессов производства масел различного назначения в блоках «Экстракция 1», «Депарафинизация», «Экстракция 2» (рис. 1).

В блоке «Экстракция 1» в качестве исходного сырья использовали вакуумные дистилляты различной вязкости, полученные при вакуумной перегонке мазута (ОАО «Нафтан»): ВД-1 ($v_{100} = 3.5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), ВД-2 ($v_{100} = 5.5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), ВД-3 ($v_{100} = 10.0 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), ВД-4 ($v_{100} = 17.0 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$). Очистку дистиллятов от смолисто-асфальтеновых веществ, ароматических углеводородов с короткими алкильными заместителями, органических соединений, содержащих атомы серы, кислорода, азота, осуществляли в одну ступень при 50°C и массовом соотношении растворитель:сырье, равном 2:1. Из рафинатного раствора выделяли рафинат реэкстракцией растворителя водой при объемном соотношении воды и рафинатного раствора 3:1 до показателя преломления промывной воды $n_D^{20} 1.3333$, который определяли с помощью рефрактометра ИРФ-454Б2М (АО «Казанский оптико-механический завод»). Экстракт из экстрактного раствора выделяли перегонкой в вакууме при остаточном давлении 5 мм рт. ст.

Для повышения селективности разделения масляного дистиллята на рафинат и экстракт в промышленный растворитель N-метилпирролидон (99.5%, АО «Экос-1») вводили 10 мас% триэтиленгликоля (98%, Carl Roth), который используется в нефтепереработке в качестве экстрагента при выделении моноциклических ароматических углеводородов из катализаторов риформинга.

В блоке «Депарафинизация» использовали композиции растворителей: изопропиловый спирт (99.9%, Химикус) + толуол (99.5%, АО «База № 1 Химреактивов») и изопропиловый спирт + метил-*трет*-бутиловый эфир (99.0%, Sigma-Aldrich, кат. номер 34875-1L). Депарафинизацию осуществляли по общепринятой методике, включающей термическую обработку смеси рафината и растворителя при температуре $75\text{--}80^\circ\text{C}$ для гомогенизации системы, далее постепенное охлаждение смеси сначала при комнатной температуре, затем в холодильной камере, наполненной смесью льда и хлорида натрия (х.ч., АО «База № 1 Химреактивов») до -18°C . Охлажденную смесь с помощью воронки Бюхнера разделяли на гач и фильтрат (масло + растворитель). Из фильтрата отгоняли при атмосферном давлении растворитель.

В блоке «Экстракция 2» для одноступенчатой селективной очистки экстрактов от полициклических ароматических углеводородов использовали растворитель N-метилпирролидон + 10 мас% этиленгликоля

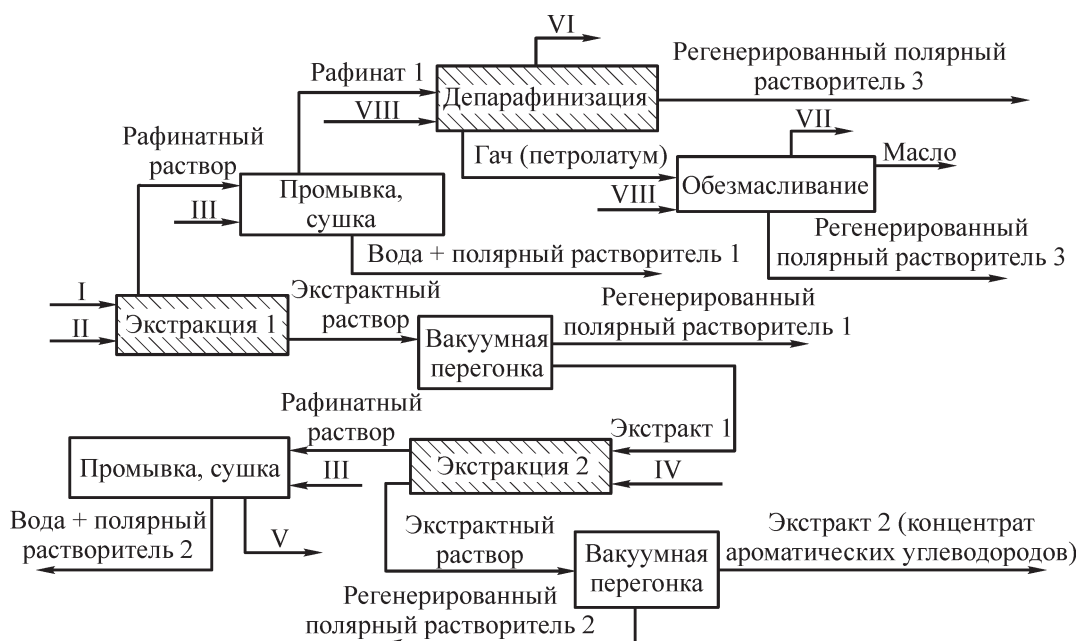


Рис. 1. Блок-схема переработки нефтяных масляных дистиллятов (деасфальтизата).

I — масляный дистиллят (деасфальтизат), II — полярный растворитель 1, III — вода, IV — полярный растворитель 2, V — рафинат 2 (очищенный ароматический экстракт 1), VI — депарафинированное масло, VII — концентрат парафиновых углеводородов, VIII — растворитель 3.

(99.8%, АО «База № 1 Химреактивов») при соотношении растворитель:сырье, равном 2:1 мас. ч., и температуре 50°C. Сырьем для данного этапа технологического процесса служил экстракт 1 (рис. 1), который перед селективной очисткой в микроволновой печи (Midea EM 720SEE, ООО «Мидеа-Горизонт») подвергали обработке СВЧ-излучением мощностью 2.45 ГГц в течение 1, 3 и 5 мин.

Исследования выполняли с применением следующих методов:

— определение показателя преломления (ГОСТ 18995.2–73. Продукты химические жидкие. Метод определения показателя преломления);

— определение анилиновой точки (ГОСТ 12329–2021. нефтепродукты и углеводородные растворители. Метод определения анилиновой точки и ароматических углеводородов);

— газохроматографический анализ парафиновых углеводородов (ASTM D 5442–2015. Standard test Method for Analysis of Petroleum Waxes by Gas Chromatography);

— определение температуры плавления гачей (ГОСТ 18995.4–73. Продукты химические органические. Метод определения интервала температуры плавления);

— определение кинематической вязкости вакуумных дистиллятов ВД-1, ВД-2, ВД-3, ВД-4, рафинатов (ГОСТ 33–2000. нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости).

Для исследования структурно-группового состава рафинатов и экстрактов использовали метод ИК-спектроскопии. Поскольку масла имеют сложный многокомпонентный состав, общий вид полученных ИК-спектров соответствует их усредненной структурно-групповой характеристике. Исследования проводили с помощью инфракрасного спектрометра ФСМ 1202 (ООО «Инфроспек») в диапазоне волновых чисел 4000–1800 см⁻¹. Испытуемые образцы углеводородных смесей наносили на кристалл КВг. Отнесение полос поглощения в ИК-спектрах проводилось в соответствии с литературными данными*: полосы поглощения алифатических структур (720, 1370, 1460 см⁻¹), ароматических структур (860, 1600 см⁻¹).

Количественное определение нейтральных масел и смолистых веществ в экстрактах осуществляли по Маркуссону** в приборе Сокслета. Для выделения

нейтральных масел использовали гептан (99.8%, АО «Экос-1»), для выделения смол использовали бензол (99.8%, АО «Экос-1») и спиртобензольную смесь с соотношением бензол:этиловый спирт (96.2%, ОАО «Бобруйский завод биотехнологий»), равным 4:1.

Для выявления различий между гачами и парафиновыми углеводородами нормального строения определяли число симметрии S_w по уравнению [3]

$$S_w = 2 \cdot 10^3 (n_D^{90} - 1.4000) - 0.84 t_{пл}, \quad (1)$$

где n_D^{90} — показатель преломления гача при 90°C, $t_{пл}$ — температура плавления гача (°C).

Обсуждение результатов

На основе данных газохроматографического анализа и прямых опытов по разделению углеводородных смесей методом жидкостной экстракции установлено [4], что триэтиленгликоль уступает N-метилпирролидону по растворяющей способности, но в его присутствии процесс экстракции ароматических углеводородов из углеводородных смесей проходит селективнее. Энергия взаимодействия молекул триэтиленгликоля с молекулой N-метилпирролидона превышает энергию взаимодействия между молекулами N-метилпирролидона, так как хроматографическая полярность, характеризующая напряженность молекулярного силового поля растворителя, триэтиленгликоля равна 83, а N-метилпирролидона — 71.3 [4]. В результате несколько снижается растворяющая способность N-метилпирролидона, повышается селективность разделения масляного дистиллята на рафинат и экстракт, соответственно снизятся потери масла с экстрактом, представляющим собой концентрат ароматических углеводородов с короткими боковыми цепями, смолисто-асфальтеновых веществ, соединений серы.

При введении триэтиленгликоля в базовый растворитель N-метилпирролидон увеличиваются выход рафината, показатель преломления, снижается анилиновая точка (табл. 1). Следовательно, в рафинате возрастает содержание ароматических углеводородов.

Анализ структурно-группового состава рафинатов с помощью инфракрасной спектроскопии позволил установить следующее. При селективной очистке масла составом N-метилпирролидон + 10 мас% триэтиленгликоля условное отношение ароматических структур к парафиновым уменьшается в 1.3 раза. Обусловлено это, по-видимому, двумя факторами — увеличением содержания в рафинате парафиновых структур нормального и разветвленного строения,

* Инфракрасные спектры и строение органических соединений / К. Наканиси. М.: Мир, 1965. С. 23–24.

** Химия нефти / В. И. Исагулянец, Г. М. Егорова. М.: Химия, 1965. С. 335–337.

Таблица 1

Характеристика рафинатов, выделенных в результате селективной очистки вакуумного дистиллята ($v_{100} = 10.0 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$)

Показатель	Растворитель	
	N-метилпирролидон	N-метилпирролидон, содержащий 10 мас% триэтиленгликоля
Выход, мас%	66.3	75.8
Показатель преломления n_D^{50}	1.4840	1.4925
Анилиновая точка, °C	70	65
Структурно-групповой анализ по данным ИК-спектроскопии:		
$C_1 = D_{1600}/D_{720}$ — условное отношение ароматических структур к парафиновым структурам нормального строения	4.7	3.5
$C_2 = D_{860}/D_{1460}$ — условное содержание полизамещенных полициклических ароматических структур	8.4	6.7
$C_3 = (D_{720} + D_{1370})/D_{1600}$ — условное отношение парафиновых структур к ароматическим структурам	0.3	0.5

т. е. параметра C_3 , и снижением содержания в рафинате полизамещенных полициклических ароматических структур (параметр C_2 уменьшается с 8.4 до 6.7). В результате в масляной фракции после селективной очистки остается больше экологически безопасных ароматических структур.

Получаемые в процессе селективной очистки масляных дистиллятов (деасфальтизата) рафинаты не могут быть использованы в качестве базовой основы при получении смазочных материалов из-за высокого содержания твердых углеводородов и соответственно высокой температуры застывания. Поэтому в технологию производства базовых масел включают процесс депарафинизации, который предназначен для удаления из нефтяного масляного сырья соединений с высокой температурой застывания.

Наиболее универсальным в отношении перерабатываемого сырья является процесс депарафинизации, основанный на различной растворимости жидких и твердых углеводородов в полярных и неполярных растворителях [5]. Роль последних чаще всего выполняют системы, состоящие из кетона (ацетон, метилэтилкетон) и ароматического углеводорода (толуол, бензол). Данный процесс в многостадийной схеме производства базовых масел является самым трудоемким и энергоемким [6], поэтому его совершенствование позволит в какой-то степени снизить затраты на его реализацию.

Состав растворителя является одним из основных факторов, определяющих технико-экономические показатели процесса низкотемпературной депарафинизации в среде растворителя. Для эффективно-

го отделения гача необходимо использовать среду, в которой не растворяются твердые парафиновые углеводороды, т. е. полярный растворитель. Кроме того, среда не должна характеризоваться высокой вязкостью и затруднять выделение твердых компонентов в процессе фильтрования дисперсной системы. В качестве полярного компонента растворителя был испытан доступный с точки зрения промышленного производства и стоимости изопропиловый спирт [7, 8].

Выход масла, получаемого в среде растворителя изопропиловый спирт–толуол, выше, чем при проведении процесса в присутствии растворителя ацетон–толуол (рис. 2, а). Однако выход депарафинированного масла с увеличением вязкости сырья, из которого выделены рафинаты, снижается. Среда изопропиловый спирт–толуол обеспечивает более высокую температуру плавления гачей (рис. 2, б).

С увеличением вязкости масляных рафинатов в гачах несколько возрастает содержание циклических структур (рис. 3), оцениваемое числом симметрии S_w [3], и уменьшается показатель n -/ iso -, характеризующий соотношение содержания парафинов нормального строения к парафинам изостроения.

Использование растворителей, в состав которых входит изопропиловый спирт для экстракционной кристаллизации, позволит увеличить выход депарафинированного масла, снизить вязкостно-температурную характеристику v_{50}/v_{100} с 4.62 до 4.38 и 4.54, показатель преломления при практически неизменном качестве концентрата парафиновых углеводородов — гача (табл. 2).

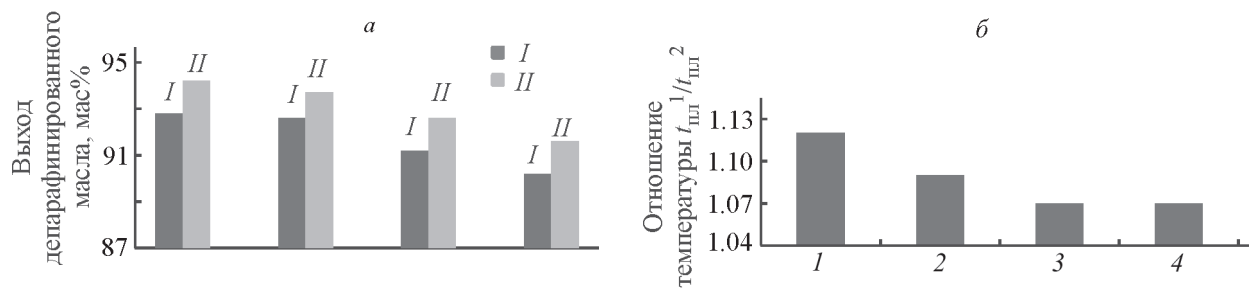


Рис. 2. Зависимость выхода депарафинированного масла (а) и для выделенных гачей отношения $t_{пл}^1/t_{пл}^2$ (б) от природы перерабатываемых рафинатов, полученных при селективной очистке масляных дистиллятов (ОАО «Нафтан»). I — ВД-1 ($v_{100} = 3.5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), 2 — ВД-2 ($v_{100} = 5.5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), 3 — ВД-3 ($v_{100} = 10 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), 4 — ВД-4 ($v_{100} = 17.0 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$). $t_{пл}^1$ — температура плавления гача при его выделении в среде изопрпиловый спирт–толуол (°С), $t_{пл}^2$ — температура плавления гача при его выделении в среде ацетон–толуол (°С). Растворитель: I — ацетон–толуол, II — изопрпиловый спирт–толуол.

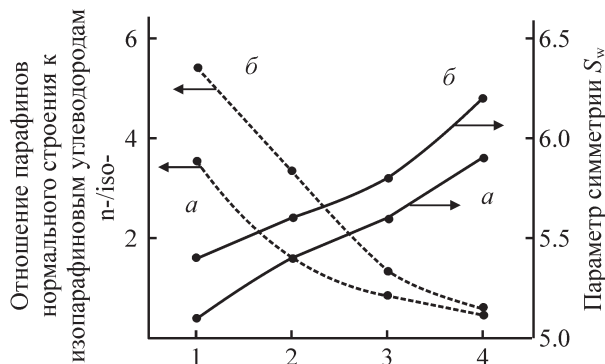


Рис. 3. Зависимость показателей n-/iso- и S_w от природы депарафинируемых рафинатов.

a — ацетон–толуол, б — изопрпиловый спирт–толуол.
I — ВД-1 ($v_{100} = 3.5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), 2 — ВД-2 ($v_{100} = 5.5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$),
3 — ВД-3 ($v_{100} = 10 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$), 4 — ВД-4 ($v_{100} = 17.0 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$).

Таким образом, использование в качестве базового компонента среды низкотемпературной депарафинизации изопрпилового спирта, характеризующегося высокой растворяющей способностью по отношению к парафиновым углеводородам изостроения, позво-

ляет интенсифицировать процесс за счет снижения потерь масла с гачем и улучшения качества масла.

Побочный продукт селективной очистки масляных дистиллятов — экстракт достаточно широко используется в производстве шин, резинотехнических изделий различного назначения в качестве пластификаторов и мягчителей в первую очередь для повышения их эластичности [9]. Однако экстракты содержат большое количество полициклических ароматических углеводородов, из которых восемь идентифицированы как канцерогенные: бензо(а)пирен, бензо(β)пирен, бензо(а)антрацен, бензо(β)флуорантен, бензо(ј)флуорантен, бензо(к)флуорантен и хризен [10]. Эти углеводороды плохо распределяются и удерживаются в каучуке и могут выделяться в окружающую среду в большом количестве при контакте шин с дорожным покрытием.

Наиболее широко для получения экологически безопасных для человека и окружающей среды масел-пластификаторов используют селективную очистку экстрактов, выделенных из масляных дистиллятов,

Таблица 2

Результаты депарафинизации вакуумного дистиллята ($v_{100} = 10.0 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$)

Растворитель	Рафинат (базовое масло)			Гач	
	выход, мас%	показатель преломления n_D^{50}	вязкостно-температурная характеристика v_{50}/v_{100}	температура плавления $t_{пл}$, °С	отношение содержания парафинов нормального строения к парафинам изостроения n-/iso-
Ацетон–метил-трет-бутиловый эфир (60:40)	95.7	1.4752	4.62	60	5.03
Изопрпиловый спирт–толуол (60:40)	97.8	1.4749	4.38	59	4.97
Изопрпиловый спирт–метил-трет-бутиловый эфир (60:40)	96.5	1.4751	4.54	61	5.21

деасфальтизата, с применением полярных растворителей различной природы, жидкого пропана [5].

Одним из способов повышения эффективности переработки нефтяных дисперсных систем, к которым относится и ароматический экстракт, является обработка с целью изменения степени структурирования (дисперсности) сырья энергией сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля и соответственно создание более благоприятных условий для контактирования экстракта с извлекаемыми компонентами в процессе селективной очистки [11, 12]. Данное воздействие не нарушает молекулярную структуру и состав нефтепродукта, но способствует понижению эффективной вязкости.

В результате комплексной обработки ароматического экстракта, включающей воздействие СВЧ-облучения и последующую селективную очистку, улучшается состав экстракта в сравнении с результатами очистки его только методом экстракции, однако выход целевого продукта снижается в 1.4 раза (табл. 3, рис. 4). По-видимому, за счет распада сольватно-адсорбционных оболочек нефтяной дисперсной фазы высвобождаются поляризующиеся компоненты (например, соединения, содержащие

бензольное кольцо) и извлекаются из системы полярным экстрагентом, а рафинат (очищенный ароматический экстракт) обогащается парафиновыми структурами. В результате снижается его вязкость, показатель преломления, содержание смолистых веществ, повышается анилиновая точка, улучшается вязкостно-температурная характеристика, снижается содержание полизамещенных полициклических структур (C_2), общее содержание ароматических структур (C_4), содержание соединений серы (C_5).

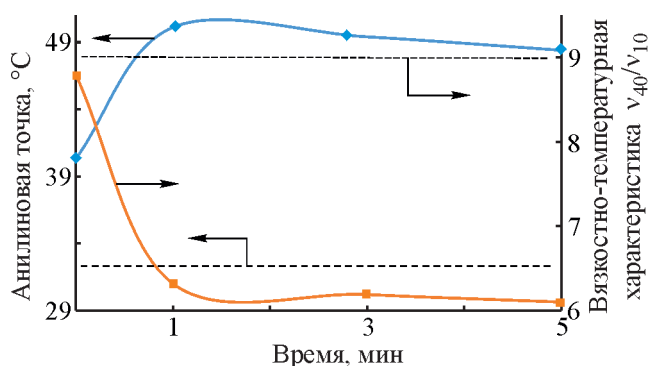


Рис.4. Влияние СВЧ-облучения на экстракционную очистку ароматического экстракта.

Таблица 3

Показатели рафинатов селективной очистки ароматического экстракта, выделенного очисткой вакуумного дистиллята

Показатель	Сырье (экстракт)	Рафинат (очищенный экстракт)			
		без обработки	СВЧ-облучение 1 мин	СВЧ-облучение 3 мин	СВЧ-облучение 5 мин
Выход, мас%	—	71.2	49.2	50.3	50.5
Показатель преломления n_D^{50}	1.5445	1.5260	1.5215	1.5210	1.5212
Кинематическая вязкость, $\text{мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$:				3	
при 40°C	894.5	726.0	331.4	04.0	297.8
при 70°C	100.6	82.5	52.4	49.1	48.8
Групповой состав, мас%:					
нейтральное масло (M)	80.3	87.3	90.3	91.0	94.4
бензольные смолы (C_6)	16.1	9.5	6.9	6.2	2.9
спирто-бензольные смолы (C_{c-6})	3.6	3.2	2.8	2.7	2.7
$C_{c-6}/(M + C_6) \cdot 100$, %	3.7	3.3	3.0	2.9	2.8
Структурно-групповой состав:					
$C_2 = D_{860}/D_{1460}$ — условное содержание полизамещенных полициклических ароматических структур	—	7.2	6.8	6.4	6.8
$C_4 = D_{1600}/D_{1460}$ — условное содержание ароматических структур	—	7.9	7.5	6.9	7.3
$C_5 = D_{1030}/D_{1460}$ — условное содержание соединений серы	—	7.9	7.5	7.1	7.5

В итоге применение комплексной технологии позволяет повысить эффективность очистки нефтяных масел от нежелательных компонентов и регулировать состав и физико-химические свойства, т. е. качество масел разного назначения.

Выводы

Использование смешанного растворителя на стадии селективной очистки вакуумного дистиллята позволит не только получать целевой продукт улучшенного качества (снижается анилиновая точка, условное отношение ароматических структур к парафиновым структурам), но и увеличить выход рафината. Применение растворителя изопропиловый спирт-толуол в процессе депарафинизации увеличивает выход депарафинированного масла, также увеличивается температура плавления гача. Обработка ароматических экстрактов СВЧ-облучением приводит к снижению выхода целевого продукта (очищенного ароматического масла), однако улучшается вязкостно-температурная характеристика, повышается анилиновая точка, снижается содержание полизамещенных полициклических структур.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Жолнеркевич Вероника Игоревна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-9617>.

Грушова Евгения Ивановна, д.т.н., проф.
Белорусского государственного технологического университета

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7405-056X>.

Аль-Разуки Ахмед Аднан Хайдер, к.т.н., стажер
Белорусского государственного технологического университета

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6387-3808>.

Горацук Юлия Александровна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5191-5903>.

Список литературы

- [1] *Филимонова И. В., Немов В. Ю., Проворная И. В., Мишенин М. В., Комарова А. В., Земнухова Е. А., Шумилова С. И., Кожевин В. Д., Новиков А. Ю.* Нефтегазовый комплекс России — 2020: в 4 ч. Часть 1. Нефтяная промышленность — 2020: долгосрочные тенденции и современное состояние. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2021. С. 61–62.
- [2] *Ляхов А. Д., Михайлов Д. М.* Стратегии развития бизнеса нефтеперерабатывающей компании на российском рынке // *Электрон. науч. журн. Вектор экономики*. 2021. № 2. С. 24.
- [3] *Переверзев А. Н., Богданов П. Ф., Роцин Ю. А.* Производство парафинов. М.: Химия, 1973. С. 36.
- [4] *Грушова Е. И., Юсевич А. И.* Применение добавок химических соединений для интенсификации процессов экстракции, флотации, адсорбции: монография. Минск: БГТУ, 2006. С. 25–34, 45.
- [5] *Антонов С. А., Братко Р. В., Матвеева А. И., Тонконогов Б. П., Килякова А. Ю., Филатов Р. В., Догадин О. Б., Никульшин П. А.* Использование модифицирующих добавок в процессе сольвентной депарафинизации // *ХТТМ*. 2020. № 4. С. 16–26 [Antonov S. A., Bartko R. V., Matveeva A. I., Nikul'shin P. A., Tonkonogov B. P., Kilyakova A. Y., Filatov R. V., Dogadin O. B. Use of modifying additives in solvent dewaxing // *Russ. Chem. Tech. Fuels Oils*. 2020. V. 56. N 4. P. 535–549. <https://doi.org/10.1007/s10553-020-01166-y>].
- [6] *Капустин В. М., Тонконогов Б. П., Фукс И. Т.* Технология переработки нефти. Производство смазочных материалов. М.: Химия, 2014. С. 153–215.
- [7] Пат. ВУ 23113 (опубл. 2020). Способ получения базового минерального масла.
- [8] Пат. 2235116 (опубл. 2004). Способ разделения нефтяного сырья.
- [9] *Пружанская Н. А., Буйко Г. Н., Филимонова Г. Д., Лукашевич И. П., Маркова Л. М.* Разработка требований к маслу ПН-6ш — мягчителю (пластификатору) шинных резин // *Тр. МИНХ и ГП им. И. М. Губкина. Пластификаторы и защитные агенты из сырья*. 1970. Вып. 85. С. 59–64.
- [10] *Охотина Н. А., Шарипов Э. Н., Ильязов М. Ф., Ефимов М. В.* Проблемы загрязнения продукции резиновой промышленности полициклическими ароматическими углеводородами. Часть 1. // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2013. Т. 16. № 3. С. 129–131.
- [11] *Цао Бо, Дергунов В. С., Челинцев С. Н.* Применение микроволновой технологии для подготовки товарных тяжелых нефтей к перекачке по магистральным трубопроводам // *ХТТМ*. 2020. № 4. С. 48–52 [Bo C., Dergunov V. S., Chelintsev S. N. Application of microwave technology for the treatment of commercial heavy oils for pumping in trunk pipelines // *Chem. Technol. Fuels and Oils*. 2020. V. 56. N 6. P. 580–587. <https://doi.org/10.1007/s10553-020-01170-2>].
- [12] *Джандосова Ф. С., Забияк В. Г., Шаехов М. В., Цой А. Н., Цой Л. А.* Использование СВЧ-излучения в процессе глубокой переработки нефти и нефтепродуктов на основе технологии радиационно-волнового крекинга // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2013. Т. 16. № 23. С. 179–182.