

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ПРЯМОГОННЫХ НЕФТЯНЫХ ФРАКЦИЙ И ГАЗОЙЛЕЙ ВТОРИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СУДОВЫХ ТОПЛИВ

© 2024 г. А. А. Гайле^{а,*}, А. В. Камешков^б, В. С. Карнаух^а, М. Ахмад^а, М. В. Шаврова^{а,б}

^а Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург, Россия

^б ООО “ПО “Киришинефтеоргсинтез”, г. Кириши, Ленинградская обл., Россия

* e-mail: gaileaa@mail.ru

Поступила в редакцию 13.11.2023 г.

После доработки 30.01.2024 г.

Принята к публикации 29.02.2024 г.

Приведены результаты одноступенчатой экстракционной очистки прямогонных керосиновой, легкой и тяжелой дизельных фракций, атмосферного газойля, легкого вакуумного газойля, а также газойля висбрекинга и легкого газойля каталитического крекинга от сернистых и азотсодержащих компонентов, полиароматических углеводородов при одинаковых условиях: использовании в качестве экстрагента смеси N-метилпирролидон-этиленгликоль состава 60: 40 мас. % при массовом отношении экстрагент: сырье 1: 1 и температуре 40 °С. Установлено, что степень извлечения экстрагируемых компонентов из нефтепродуктов близкого фракционного состава повышается в следующем ряду: прямогонные фракции < газойль висбрекинга < легкий газойль каталитического крекинга. При производстве судовых топлив, удовлетворяющих экологическим требованиям, наиболее эффективна экстракционная очистка газойлей вторичных процессов нефтепереработки, имеющих повышенное содержание гетероциклических сернистых и азотистых соединений ароматического характера, полиароматических углеводородов с короткими алкильными заместителями, стабильных при термических и каталитических процессах.

Ключевые слова: экстракция, прямогонные дистилляты, газойль висбрекинга, легкий газойль каталитического крекинга, N-метилпирролидон, этиленгликоль, судовое топливо

DOI: 10.31857/S0040357124020033, EDN: CUODQD

ВВЕДЕНИЕ

При обессеривании дизельного топлива гидроочисткой с остаточным содержанием серы до 10 мг/кг возникают проблемы, связанные с низкой скоростью гидрогенолиза алкилпроизводных дибензотиофена [1]. Еще менее реакционноспособны азотсодержащие гетероциклические соединения, дезактивирующие катализаторы гидрогенизационных процессов. Процесс гидроочистки приходится проводить при повышенном давлении и температуре с меньшей объемной скоростью подачи сырья с использованием дополнительных реакторов и высоким расходом водорода.

К судовым топливам предъявляются значительно менее жесткие требования по содержанию серы – 0.1 мас. % в зонах контроля состава отработавших газов и не более 0.5 мас. % в открытых акваториях. Как показано в работах, выполненных

в СПбГТИ (ТУ) совместно с ООО “ПО “Киришинефтехим”, снижение содержания серы в рафинатах возможно четырехступенчатой противоточной экстракцией с N, N-диметилформамидом или N-метилпирролидоном. Экстракционная очистка газойлей вторичных термических процессов нефтепереработки – висбрекинга и в особенности замедленного коксования – протекает значительно легче, при меньшем соотношении экстрагентов к сырью, чем прямогонных вакуумных газойлей [2].

Эффективность экстракционной очистки прямогонных дистиллятов и газойлей вторичных высокотемпературных и каталитических процессов обсуждается в ряде обзоров последних лет [3–8].

Эффективность растворителей при экстракции зависит от трех термодинамических факторов [9]:

– групповой селективности по отношению к экстрагируемым компонентам ароматического

характера, значение которой описывается отношением предельных коэффициентов активности компонентов модельной системы гексан-бензол ($\gamma_r^\circ/\gamma_b^\circ$) в растворителе;

– растворяющей способности экстрагента, от которой зависит требуемое соотношение к сырью, которую можно охарактеризовать величиной, равной обратному значению предельного коэффициента активности бензола ($1/\gamma_b^\circ$);

– селективность по молекулярным массам, которую предложено рассчитывать как отношение предельных коэффициентов активности углеводородов-гомологов, например гептана и гексана ($\gamma_{гп}^\circ/\gamma_r^\circ$), или логарифмом этого отношения – $\lg(\gamma_{гп}^\circ/\gamma_r^\circ)$; в отличие от критерия групповой селективности желательнее, чтобы этот критерий был низким – в этом случае обеспечивается достаточно высокая степень извлечения не только низкокипящих, но и высококипящих экстрагируемых компонентов.

Групповая селективность полярных растворителей зависит от неравномерности распределения зарядов в их молекулах, определяющей стабильность π -комплексов с ароматическими соединениями. Установлены линейные корреляции групповой селективности растворителей с σ -константами заместителей в их молекулах с использованием уравнений, аналогичных уравнениям Гаммета – Тафта, применяющимся для количественной оценки реакционной способности [10, 11]. Такие корреляционные зависимости селективности установлены для ряда серий растворителей: производных бензола, нафталина, пиридина, хинолина, пиррола, фурана, тиафена с полярными заместителями, а также для производных метана с различными функциональными группами.

В конце 1990-х гг., когда стали более совершенными квантово-химические методы расчета зарядового распределения на атомы в молекулах растворителей, установлена универсальная линейная зависимость селективности от силового поля молекул растворителей, характеризуемого отношением суммы положительных зарядов атомов к молярному объему растворителей $\sum q_i^+ / V_i$ [12].

Растворяющая способность экстрагентов зависит от разности параметров растворимости Гильдебранда экстрагента и растворяемых компонентов. Полярные сильноассоциированные экстрагенты (вода, этиленгликоль и др.) проявляют большие положительные отклонения от закона Рауля с углеводородами и низкую растворяющую способность. Чем более ассоциированы молекулы экстрагента, тем выше и его селективность по молекулярным массам, что нежелательно.

Коэффициенты активности углеводородов при бесконечном разбавлении (предельные коэффициенты активности) в 506 растворителях, определенные в СПБГТИ (ТУ), приведены в справочнике [13], мировые данные о значениях γ_i° углеводородов в 691 растворителях сведены в монографии [14], а предельные коэффициенты активности не только углеводородов, но и различных веществ – в справочнике [15–17]. Значения γ_i° компонентов газойлей каталитического крекинга в исследованных растворителях приведены в табл. 1.

Таблица 1. Предельные коэффициенты активности компонентов и селективные свойства N-метилпирролидона и этиленгликоля

Показатели	N-метилпирролидон (60 °C)		Этиленгликоль (25 °C)	
	Значения показателей	Литер. источник	Значения показателей	Литер. источник
γ° :				
н-гексан	8.60	[16]	630	[22]
1-гексен	6.10	[17]	280	[22]
циклогексан	6.30	[18]	–	–
бензол	1.08	[18]	31.0	[18]
тиофен	0.78	[19]	–	–
$\gamma_r^\circ/\gamma_b^\circ$	7.96	–	20.3	–
$\gamma_r^\circ/\gamma_t^\circ$	11.0	–	–	–
$1/\gamma_b^\circ$	0.93	–	0.032	–
$\gamma_{гп}^\circ/\gamma_r^\circ$	1.246	[14]	1.706	[14]

В обзоре [2] не рассмотрены результаты экстракционной очистки газойлей каталитического крекинга, которые отличаются от газойлей висбрекинга и замедленного коксования повышенным содержанием ароматических углеводородов – 50–85 мас.% [23]. В связи с этим экстрагенты, использованные для экстракционной очистки в обзоре [2], N, N-диметилформамид и N-метилпирролидон образуют гомогенную систему с легким газойлем каталитического крекинга. Для образования гетерогенной системы и возможности проведения экстракции в данной работе, целью которой было сравнение степени извлечения экстрагируемых компонентов из различных видов сырья при одинаковых параметрах экстракции с использованием одного и того же экстрагента, состав которого лимитируется экстракционной очисткой легкого газойля каталитического крекинга – смесь N-метилпирролидона

с этиленгликолем при массовом соотношении компонентов 60: 40 мас.%. Смешанный растворитель такого состава применяется в процессе Arosolvan экстракции бензола, толуола и ксилолов из риформатов [24].

N-Метилпирролидон проявляет высокую растворяющую способность и низкую селективность по молекулярным массам, а преимущество этиленгликоля – повышенная групповая селективность по отношению к аренам и гетероциклическим соединениям ароматического характера (табл. 1). Селективность N-метилпирролидона по отношению к тиофену выше, чем к бензолу, по ряду причин:

- более стабильного π-комплекса с тиофеном вследствие сопряжения неподеленных электронных пар атома серы с двойными связями тиофенового цикла;

- молекулы тиофена, в отличие от бензола, способны к ориентационному взаимодействию с молекулами N-метилпирролидона;

- меньший молярный объем тиофена, по сравнению с бензолом (78.9 и 88.7 см³/моль соответственно при 20 °С), приводит к меньшим затратам энергии на образование полости в структуре растворителя при растворении тиофена.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Одноступенчатые экстракции всех образцов сырья проводили в термостатированных делительных воронках с мешалкой при 40 °С и массовом соотношении смешанного экстрагента N-метилпирролидон-этиленгликоль 60: 40 мас.% к сырью 1: 1. Компоненты экстрагента образуют с водой системы, близкие к псевдоидеальным: предельные коэффициенты активности N-метилпирролидона и этиленгликоля в воде при 45 °С равны 0.86 и 1.00 соответственно [17], поэтому они легко реэкстрагируются из рафинатных фаз водой. Тем не менее в связи с тем, что N-метилпирролидон содержит атом азота, необходимо тщательное удаление экстрагентов, которое проводили трехступенчатой экстракцией в перекрестном токе дистиллированной водой при ее объемном соотношении к рафинатным фазам 2: 1.

В качестве примера приведен материальный баланс экстракционной очистки газойля висбрекинга, полученного с установки ООО “ПО “Киришинефтеоргсинтез” (табл. 2).

Анализ образцов сырья и рафинатов проводили с использованием следующих методов:

- фракционный состав – ATSM D7345;
- содержание серы – ГОСТ 32 139;
- содержание азота – ASTM D5762 при содержании азота более 100 мг/кг; ASTM D4629 – при менее 100 мг/кг;

- массовая доля моно-, ди- и три⁺-ароматических углеводородов – ГОСТ EN12916;

- бромное число – ГОСТ 8997.

Таблица 2. Материальный баланс одноступенчатой экстракции газойля висбрекинга смешанным экстрагентом N-метилпирролидон-этиленгликоль состава 60: 40 мас.%

Компонент	Исходная система		Рафинатная фаза		Экстрактная фаза	
	г	мас. %	г	мас. %	г	мас. %
Сырье	35.2	50.0	26.4	83.3	8.8	22.7
Экстрагент	35.2	50.0	5.3	16.7	29.9	77.3
Всего	70.4	100.0	31.7	100.0	38.7	100.0

Анализы проводили в исследовательской лаборатории ООО “ПО “Киришинефтеоргсинтез” на следующих приборах:

- ароматических углеводородов – на жидкостном хроматографе ProStar (Varian, США);

- содержание общей серы волнодисперсионным рентгенофлуоресцентным методом – Mini-Z (Rigaku, Япония);

- содержание общего азота – Antek 9000 (Antek, США) и TN3000 (Termo Electron, Нидерланды);

- фракционный состав – автоматизированный аппарат микро-дистилляции PMD110 (ISL, Франция).

Цетановый индекс образцов сырья и рафинатов рассчитывали в соответствии с ГОСТ 27768:

$$\text{ЦИ} = 454.74 - 1641.41\rho + 774.74\rho^2 - 0.554t_{50} + 97.803(\lg t_{50})^2,$$

где ρ – плотность при 15 °С, г/см³; t_{50} – температура выкипания 50% об. фракции при атмосферном давлении, °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические свойства образцов сырья и рафинатов приведены в табл. 3. Показатели преломления и плотности рафинатов ниже, чем исходных фракций, что обусловлено частичным экстрагированием аренов и гетероциклических компонентов, имеющих более высокие значения этих показателей.

Фракционный состав образцов сырья представлен в табл. 4. Довести стандартную разгонку легкого газойля каталитического крекинга до конца кипения не удалось из-за его низкой термической стабильности, обусловленной повышенным содержанием непредельных углеводородов.

Состав образцов сырья и рафинатов, а также цетановые индексы охарактеризованы в табл. 5.

Таблица 3. Физико-химические свойства образцов сырья и рафинатов одноступенчатой экстракционной очистки

Номер образца	Наименование	n_D^{20}	ρ_4^{20}	ρ_4^{15}
1	Керосиновая фракция	1.4380	0.7817	0.7857
2	Рафинат	1.4350	0.7695	0.7736
3	Легкая дизельная фракция	1.4610	0.8295	0.8332
4	Рафинат	1.4570	0.8157	0.8195
5	Тяжелая дизельная фракция	1.4820	0.8664	0.8698
6	Рафинат	1.4770	0.8547	0.8582
7	Атмосферный газойль	1.4860	0.8698	0.8732
8	Рафинат	1.4810	0.8592	0.8627
9	Легкий вакуумный газойль	1.5060	0.9065	0.9097
10	Рафинат	1.5000	0.8882	0.8915
11	Газойль висбрекинга	1.4740	0.8460	0.8496
12	Рафинат	1.4690	0.8395	0.8431
13	Легкий газойль каталитического крекинга	1.5420	0.9340	0.9370
14	Рафинат	1.5255	0.8880	0.8913

Таблица 4. Фракционный состав образцов сырья, °С

% отгона	№ образца						
	1	3	5	7	9	11	13
н. к.	144	208	274	227	272	191	240
10%	157	230	302	253	331	222	258.5
50%	182	260	328	305	366	270	301.5
90%	210	287	351	358	412	319	345.5
к. к.	232	301	362	384	458	340	
Выход, %	98.2	98.1	97.8	97.7	97.5	97.0	

Таблица 5. Характеристика образцов сырья и рафинатов одноступенчатой экстракционной очистки

Номер образца	Содержание серы, мас. %	Содержание азота, ppm	Содержание аренов, мас. %			Бромное число, г Br ₂ /100 г	Цетановый индекс
			моно-	ди-	три ⁺ -		
1	0.216	1.3	16.2	1.0	0.0	1.8	42.1
2	0.198	—	14.4	0.6	0.0	1.5	47.3
3	0.790	16	20.6	6.2	0.1	4.4	51.3
4	0.697	—	19.9	4.5	0.0	4.2	56.3
5	1.38	320	22.2	10.8	0.4	6.4	50.5
6	1.27	140	23.3	9.5	0.2	6.0	54.0
7	1.57	250	25.4	12.9	0.7	9.4	46.8
8	1.42	140	25.9	10.2	0.2	7.7	51.1
9	1.89	1700	46.3	14.0	1.4	9.1	42.6
10	1.76	660	25.5	5.7	0.3	9.7	47.1
11	2.00	470	24.0	8.0	0.1	35.9	48.0
12	1.72	83	23.5	6.9	0.0	34.6	50.2
13	2.1	880	21.4	39.0	10.7	12.3	31.1
14	1.62	295	22.6	35.4	4.1	9.4	41.4

Во всех рафинатах снижается содержание серы, азота, ди- и три⁺-ароматических углеводов. Бромные числа рафинатов изменяются менее значительно, так как непредельные углеводороды образуют менее стабильные π -комплексы, чем арены, и экстрагируются менее эффективно.

Степень извлечения экстрагируемых компонентов, рассчитанная с учетом выхода рафинатов и составов сырья и рафинатов, представлена в табл. 6. Наиболее легко экстрагируются азотистые соединения и три⁺-ароматические углеводороды. Азотистые соединения представлены в прямогонных фракциях и в особенности в газойлях термических и термокаталитических процессов наиболее стабильными гетероциклическими соединениями ароматического характера. При высокой температуре происходит разрыв C–C-связей алкильных заместителей, а остающиеся гетероциклические компоненты без алкильных заместителей или с метильными группами имеют низкие коэффициенты активности в полярных растворителях и легко экстрагируются, что установлено при экстракции карбазола и индола N-метилпирролидоном из модельных смесей с ундеканом [25].

Полиароматические углеводороды также легко экстрагируются полярными растворителями, так как с увеличением числа ароматических циклов возрастает их электронодонорная способность и стабильность π -комплексов с электроноакцепторными экстрагентами [26]. При этом электронодонорная способность ароматических азотистых гетероциклических соединений выше, чем аренов с одинаковым числом циклов из-за сопряжения неподеленной электронной пары азота с двойными связями, а гомологи индола и карбазола, имеющие при азоте подвижный атом водорода, образуют еще и водородную связь благодаря карбонильному фрагменту в молекуле N-метилпирролидона.

Степень извлечения сераорганических соединений из прямогонных фракций ниже, чем азо-

тистых, а также ди- и три⁺-аренов, что обусловлено наличием в них, кроме гомологов тиофена, бензотиофена и дибензотиофена, насыщенных сернистых соединений – диалкилсульфидов, тиацикланов, не образующих π -комплексы с полярными растворителями. Степень извлечения сернистых компонентов из газойлей висбрекинга и каталитического крекинга, протекающих при температуре 450–490 °C выше, чем из близкокипящих прямогонных фракций. Энергия разрыва связей C_{Ar}–S значительно выше, чем соответствующих одинарных связей C–S и C–N [27, 28]. Так, энергии двойных и одинарных связей C–N составляют 615 и 305 кДж/моль [28]. Поэтому диалкилсульфиды и тиацикланы при высокой температуре вторичных процессов подвергаются деструкции, а остающиеся компоненты с тиофеновой серой легко экстрагируются.

Еще легче проводится экстракционная очистка легкого и тяжелого газойлей замедленного коксования, по сравнению с газойлем висбрекинга [29, 30]. Это объясняется значительно более продолжительным пребыванием сырья при высокой температуре 450–500 °C в печи и выносной камере. При продолжительной выдержке в камере успевают в большей степени пройти процессы деструкции насыщенных сернистых соединений и длинных алкильных заместителей. Так, при пятиступенчатой противоточной экстракции при 40 °C легкого газойля замедленного коксования N, N-диметилформамидом при массовом отношении к сырью всего 0.5: 1 содержание серы в рафинате, полученном с выходом 77.5 мас.%, снизилось с 0.97 до 0.47 мас.%, удовлетворяющим требованиям к судовым топливам.

Добавление 40 мас.% этиленгликоля к N-метилпирролидону для образования гетерогенной системы с высокоароматизированным легким газойлем каталитического крекинга приводит к значительному снижению растворяющей способности смешанного экстрагента и к необходимости повышения соотношения смешанного

Таблица 6. Выход рафинатов и степень извлечения компонентов при экстракционной очистке образцов сырья

Номер образца	Выход рафината, мас. %	Степень извлечения, мас. %					
		Сернистых компонентов	Азотистых соединений	моно-аренов	ди-аренов	три ⁺ -аренов	олефинов
1	67.1	38.5	–	40.4	59.7	–	44.1
3	69.6	38.6	–	32.8	49.5	100	34.0
5	75.1	30.9	67.2	21.2	34.0	62.5	29.6
7	78.3	29.2	56.2	20.2	38.1	77.6	35.9
9	87.2	18.8	66.1	52.0	64.5	81.3	7.1
11	75.0	35.5	86.8	26.6	35.3	100	27.7
13	64.1	50.6	78.5	32.3	41.8	75.4	51.0

экстрагента к сырью. Возможно обойтись и без использования в составе экстрагента этиленгликоля при экстракционной очистке смеси газойлей каталитического крекинга и висбрекинга с меньшим содержанием компонентов ароматического характера. Так, при пятиступенчатой экстракционной очистке смеси газойлей висбрекинга и легкого газойля каталитического крекинга состава 70:30 мас. % N, N-диметилформамидом при массовом соотношении к сырью 0.75:1 в присутствии гексана (соотношение к сырью 0.95:1), добавляемого для увеличения выхода рафината, содержание серы снижается с 0.81 до 0.38 мас. % [31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных одноступенчатых экстракций различных прямогонных фракций, газойлей висбрекинга и легкого газойля каталитического крекинга одним и тем же смешанным экстрагентом N-метилпирролидон-этиленгликоль состава 60:40 мас.%, выбранным для образования гетерогенной системы с газойлем каталитического крекинга, степень обессеривания сырья увеличивается в ряду:

легкий вакуумный газойль < атмосферный газойль < тяжелая дизельная фракция < газойль висбрекинга < легкий газойль каталитического крекинга.

Полученный ряд повышенной эффективности экстракционной очистки согласуется с ранее сделанными выводами о более высокой степени извлечения сернистых, азотистых компонентов и полиароматических углеводородов из газойлей висбрекинга и замедленного коксования, позволяющих получать компоненты судового топлива с содержанием серы менее 0.5 мас.% при низких соотношениях экстрагентов к газойлям высокотемпературных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stanislaus A., Marafi A., Rana M.S. Recent advances in the science and technology of ultra-low sulfur diesel (ULSD) production // *Catal. Today*. 2010. V. 153. № 1. P. 1–68.
2. Гайле А.А., Камешков А.В., Клементьев В.Н., Верещачгин А.В. Получение компонентов судовых топлив экстракционной очисткой вакуумных газойлей и газойлей вторичных процессов нефтепереработки (обзор) // *Нефтехимия*. 2023. Т. 63. № 3. С. 297–304. [Gaile A.A., Kameshkov A.V., Klement'ev V.N., Vereshchagin A.V. Production of Marine Fuel Components by Extraction Treatment of Vacuum Gasoils and Gasoils from Secondary Oil Refining Processes (A Review) // *Pet. Chem*. 2023. V. 63. № 3. P. 489–509].
3. Максимов Н.М., Солманов П.С., Моисеев А.В., Еремина Ю.В., Жилкина Е.О., Тимошкина В.В., Ве-

ревкин С.П., Пимерзин А.А. Селективная очистка легкого газойля каталитического крекинга N-метилпирролидоном с целью получения высокоплотного компонента реактивного топлива или жидкого органического носителя водорода // *Ж. прикладной химии*. 2021. Т. 94. № 4. С. 507–515. [Maksimov N.M., Solmanov P.S., Moiseev A.V., Eremina Yu.V., Zhilkina E.O., Timoshkina V.V., Verevkin S.P., Pimerzin A.A. Selective treatment of light catalytic cracking gasoil with N-methylpyrrolidone to obtain a high-density jet fuel component or a liquid organic hydrogen carrier // *Russ. J. Appl. Chem*. 2021. V. 94. № 4. P. 501–508].

4. Катасонова О.Н., Савонина Е.Ю., Марютина Т.А. Экстракционные методы выделения серы и ее соединений из нефти и нефтепродуктов (обзор) // *Ж. прикладной химии*. 2021. Т. 94. № 4. С. 411–433. [Katasonova O.N., Savonina E. Yu., Maryutina T.A. Extraction methods for removing sulfur and its compounds from crude oil and petroleum products (a review) // *Russ. J. Appl. Chem*. 2021. V. 94. P. 411–436].
5. Гайле А.А., Верещачгин А.В., Клементьев В.Н. Облагораживание дизельных и судовых топлив экстракционными и комбинированными методами. Часть 1. Использование ионных жидкостей в качестве экстрагентов (обзор) // *Ж. прикладной химии*. 2019. Т. 92. № 4. С. 411–435. [Gaile A.A., Vereshchagin A.V., Klement'ev V.N. Refining of diesel and ship fuels by extraction and combined methods. Part 1. Use of ionic liquids as extractants (a review) // *Russ. J. Appl. Chem*. 2019. V. 92. P. 453–475].
6. Гайле А.А., Верещачгин А.В., Клементьев В.Н. Облагораживание дизельных и судовых топлив экстракционными и комбинированными методами. Часть 2. Использование органических растворителей в качестве экстрагентов (обзор) // *Ж. прикладной химии*. 2019. Т. 92. № 5. С. 547–559. [Gaile A.A., Vereshchagin A.V., Klement'ev V.N. Refining of diesel and ship fuels by extraction and combined methods. Part 2. Use of organic solvents as extractants (a review) // *Russ. J. Appl. Chem*. 2019. V. 92. P. 583–592].
7. Kumar S., Srivastava V.C., Nanoti S.M. Extractive Desulfurization of gas oils: a perspective review for use in petroleum refineries // *Separation and Purification Reviews*. 2017. V. 46. P. 1–49.
8. Chandran D., Khalid M., Walvekar N.M., Dharaskar S., Wong W.Y., Gupta T.C.S.M. Deep eutectic solvents for extraction-desulphurization. A review // *J. Mol. Liq*. 2019. V. 275. P. 312–322.
9. Феттер Г., Костерс В.К. О критериях эффективности экстрагентов // Труды VI Междунар. нефтяного конгресса. Вып. 2–4. М.: ВНИИТЭнефтегаз, 1965. С. 223.
10. Гайле А.А., Лейтман Я.И. Зависимость селективности от структуры растворителей и разделяемых компонентов. I. О применимости уравнения Гаммета для оценки селективности ароматических растворителей // *Ж. физической химии*. 1967. Т. 41. № 11. С. 2886–2889.
11. Биттрих Г.-Й., Гайле А.А., Лемпе Д., Проскуряков В.А., Семенов Л.В. Разделение углеводородов с использованием селективных растворителей. Л.: Химия, 1987. 192 с.

12. *Гайле А.А., Зуйков А.А., Семенов Л.В., Сомов В.Е.* Электронная структура молекул полярных растворителей и их селективность при разделении углеводородных систем // Экстракция и применение аренов среднестиллятных нефтяных фракций / Сб. трудов ООО "ПО "КИНЕФ". Под ред. А.А. Гайле и В.Е. Сомова. СПб.: "ИК Синтез", 1998. С. 30–45.
13. *Гайле А.А., Проскураков В.А., Семенов Л.В., Пульцин М.Н., Парижева Н.В., Захаров А.П., Антер Ю.М., Солодова Н.И.* Предельные коэффициенты активности углеводородов в селективных растворителях: справочник / Под ред. А.А. Гайле. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2002. 128 с.
14. *Гайле А.А., Сомов В.Е., Камешков А.В.* Селективные растворители. Разделение и очистка углеводородсодержащего сырья. СПб.: Химиздат, 2019. 896 с.
15. *Gmehling J., Menke J., Schiller M.* Activity coefficients at infinite dilution. Pt. 3. C₁₇-C₉ Frankfurt/Main: DECHEMA, 1994. P. 919–1387.
16. *Gmehling J., Menke J., Schiller M.* Activity coefficients at infinite dilution. Pt. 4. C₁₀-C₃₆ Frankfurt/Main: DECHEMA, 1994. P. 1390–1844.
17. *Gmehling J., Menke J.* Activity coefficients at infinite dilution. Pt. 6. C₁₇-C₇₈ with D₂O and H₂O. Frankfurt/Main: DECHEMA, 2008. P. 2450–2741.
18. *Deal C.H., Derr E.L.* Selectivity and Solvency in Aromatic Recovery // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 1964. V. 3. № 4. P. 394–399.
19. *Hradetzky G., Wobst M., Vopel H., Bittrich H.-J.* A comparison of the predictive capability of different group contribution methods // Fluid Phase Equilibria. 1990. V. 54. P. 133–145.
20. *Hradetzky G., Hammerl I., Kisan W., Wehner K., Bittrich H.-J.* Data of selective solvent: DMFA-NMC-NMP. Berlin: VEB Deutscher der Wissenschaften, 1989. 360 p.
21. *Gu Z., Zhao W., Zheng Y., Shi J.* // J. Chem. Eng. Chin. Univ. 1991. V. 5. P. 79.
22. *Masalsceky T., Popescu R.* Utilizarea coeficientilor de activitate la dilute infinita in studiul separarii hidrocarburilorolefinice si diolefinice // Rev. Chim. (Bucharest). 1976. V. 27. P. 292.
23. *Каминский Э.Ф., Хавкин В.А., Курганов В.М.* Получение экологически чистых дизельных топлив // Химия и технология топлив и масел. 1996. № 2. С. 14–15.
24. *Muller E., Hohfeld G.* Organ der Deutschen Gesellschaft für Mineralölwissenschaft und kohlechemie // Erdol und Kohle-Erdgas-Petrochem. ver. Brennst.-Chem. 1971. Bd. 24. № 9. S. 573–578.
25. *Верещагин А.В., Гайле А.А., Клементьев В.Н., Фатун Д.А.* Фазовое равновесие жидкость-жидкость в трехкомпонентных системах н-ундекан-арен (или гетероциклическое соединение) – N-метилпирролидон // Нефтепереработки и нефтехимия. 2017. № 11. С. 17–21.
26. *Гайле А.А., Семенов Л.В.* Селективность экстрагентов в процессах разделения и очистки углеводородсодержащего сырья // Wissenschaftliche Zeitschrift TH Leuna – Merseburg. 1990. V. 32. № 4. S. 517–518.
27. *Веденев В.И., Гурвич Л.В., Кондратьев В.Н., Медведев В.А., Франкевич В.И.* Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродства к электрону: Справочник. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 216 с.
28. *Анчита Х., Снейт Дж.* Переработка тяжелых нефтей и нефтяных остатков. Гидрогенизационные процессы. СПб.: ЦОП "Профессия", 2012. 384 с.
29. *Камешков А.В., Гайле А.А., Баймаков П.Ю., Петрова А.Э.* Одноступенчатая и многоступенчатая экстракционная очистка легкого газойля установки замедленного коксования ОАО "Газпромнефть – Омский НПЗ" // Изв. СПбГТИ (ТУ). 2022. № 60. С. 7–10.
30. *Камешков А.В., Гайле А.А., Ахмад М., Воробьева А.Р.* Экстракционная очистка тяжелого газойля установки замедленного коксования N-метилпирролидоном // Ж. прикладной химии. 2021. Т. 94. № 12. С. 1383–1389. [*Kameshkov A.V., Gaile A.A., Ahmatad M., Vorob'eva A.R.* Extraction treatment of delayed coker heavy gas oil with N-methylpyrrolidone // Russ. J. Appl. Chem. 2021. V. 94. P. 1635–1640].
31. *Гайле А.А., Чистяков В.Н., Колдобская Л.Л., Колесов В.В.* Экстракционная очистка легких газойлей вторичных процессов переработки нефти // Химия и технология топлив и масел. 2012. № 3. С. 15–19.