

## МНОГОСТУПЕНЧАТАЯ ЭКСТРАКЦИОННАЯ ОЧИСТКА ГАЗОЙЛЯ ВИСБРЕКИНГА N,N-ДИМЕТИЛФОРМАМИДОМ

© А. В. Камешков<sup>1</sup>, А. А. Гайле<sup>2,\*</sup>, М. Ахмад<sup>2</sup>, А. Р. Воробьева<sup>2</sup>, П. Ю. Башмаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез»,

187110, Ленинградская обл., Киришский р-н, г. Кириши, ш. Энтузиастов, д. 1

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),  
190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26

\* E-mail: gaileaa@mail.ru

Поступила в Редакцию 20 мая 2021 г.

После доработки 31 августа 2021 г.

Принята к публикации 15 сентября 2021 г.

*Приведено описание результатов четырехступенчатой экстракционной очистки газойля висбрекинга ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез» от серо- и азотсодержащих компонентов, полиароматических и непредельных углеводородов в перекрестном токе и противоточном процессе при массовом соотношении N,N-диметилформамид:сырье = 0.4:1, 0.5:1 и 0.75:1. Описаны физико-химические свойства полученных рафинатов и экстрактов, их состав и степень извлечения компонентов, наличие которых в дизельных и судовых топливах нормативно ограничено современными экологическими требованиями.*

Ключевые слова: газойль висбрекинга; N,N-диметилформамид; четырехступенчатая экстракция

DOI: 10.31857/S0044461821080144

Газойли термодеструктивных процессов переработки тяжелого нефтяного сырья, в том числе получаемые на установках висбрекинга, низкачественные по сравнению с прямогонными среднестиллятными фракциями. Парафиновые углеводороды крекируются с образованием низкомолекулярных алканов и алкенов. Нафтеновые и ароматические углеводороды, а также гетероциклические серо- и азотсодержащие соединения с длинными алкильными заместителями крекируются так, что боковые цепи укорачиваются до метильных или этильных групп, при этом гомологи полициклоаренов, дибензотиофена, бензотиофена, индола, хинолина, карбазола, содержащиеся в вакуумных газойлях, концентрируются в атмосферных газойлях [1]. При крекинге образуются и голаядерные соединения ароматического характера, о чем свидетельствует повышение доли атомов водорода при атомах углерода в составе ароматических колец [2].

Гетероциклические серо- и азотсодержащие компоненты газойля висбрекинга, добавляемого к прямогонным дизельным фракциям, трудно подвергаются гидрогенолизу по сравнению с насыщенными сераорганическими соединениями [3]. Азотистые соединения промотируют полимеризацию непредельных углеводородов, усиливают смолообразование, дезактивируют кислотные центры катализаторов гидроочистки. Смолы и полициклоарены ускоряют закоксовывание катализаторов гидроочистки.

Вследствие нормативных ограничений по содержанию в дизельном топливе не только серы, но и полициклоаренов, разработаны двустадийные процессы: на первой стадии на Ni-Mo- или Ni-W-катализаторах при 340–380°C и давлении 50–70 атм содержание серы снижается до 30–100 ppm, а на второй стадии в присутствии катализатора на основе благородных металлов при 260–300°C и дав-

лении до 70 атм содержание аренов снижается до уровня 10 мас% и серы — до 5–10 ppm [4]. Возможно получение дизельного топлива, удовлетворяющего требованиям Евро-5\* и при одноступенчатом процессе, но при параметрах процесса мягкого гидрокрекинга — давлении около 90 атм, температуре 350–370°C, объемной скорости подачи сырья 2–2.5 ч<sup>-1</sup> [5].

В то же время наиболее трудно удаляемые нежелательные компоненты дизельного топлива, содержащегося в газойле висбрекинга, гетероциклические азот- и сераорганические соединения ароматического характера, полициклоарены с короткими алкильными заместителями легче всего экстрагируются полярными селективными растворителями, в том числе N,N-диметилформамидом [6]. Так, даже при одноступенчатой экстракции при 20°C из модельных систем с ундеканом при содержании в них экстрагируемого компонента 10 мас% и массовом соотношении N,N-диметилформамид:сырье = 1:1 степень извлечения карбазола, индола, дибензотиофена, фенантрена составляет 98.8, 96.6, 93.2 и 86.2 мас% соответственно.

В работе [7] приведены результаты экстракционной очистки легкого газойля установки висбрекинга ООО «ЛУКОЙЛ–Нижегороднефтеоргсинтез» с содержанием серы 1.853 мас% и азота 465 ppm. Газойль разделяли на легкую фракцию, экстракционную очистку которой проводили фенолом с содержанием воды 10 мас%, и тяжелую фракцию (>234°C), для очистки которой использовали N-метилпирролидон с 1 мас% воды. Выбор экстрагентов проводили с учетом отсутствия образования гомогенных азеотропов с ароматическими компонентами фракций, которые осложнили бы регенерацию экстрагентов. В легкой фракции газойля преобладают насыщенные сераорганические соединения, по отношению к которым наиболее эффективен фенол [8]. В тяжелой фракции преобладают бензолы тиофена и пиррола, при экстракции которых более селективны апротонные растворители, в том числе N-метилпирролидон. Смешением выделенных рафинатов получено сырье для последующего процесса гидроочистки с содержанием серы и азота 0.44 мас% и 46 ppm соответственно.

Технологическая схема экстракционного процесса с использованием двух экстрагентов, которые необходимо раздельно регенерировать, очень сложна. Ранее предлагался подобный процесс экстракционной очистки с использованием на первой стадии

апротонного растворителя — фурфурола, а на второй стадии фенола [9], однако применения в промышленности он не получил. Совместное же использование в одноступенчатом экстракционном процессе апротонного растворителя — N-метилпирролидона и протонодонорного экстрагента — фенола не приводит к аддитивному эффекту по степени извлечения тиофеновой и сульфидной серы из-за образования водородной связи между молекулами экстрагентов [10].

Цель работы — установление степени извлечения серо- и азотсодержащих соединений, полиароматических углеводородов и олефинов при экстракционной очистке газойля висбрекинга ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез» с использованием растворителя — N,N-диметилформамида.

### Экспериментальная часть

Характеристика использованного в работе газойля висбрекинга приведена в табл. 1.

Содержание моноароматических и полиароматических углеводородов в газойле и рафинатах определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с детектированием по коэффициенту рефракции на жидкостном хроматографе ProStar 210 (Varian). Содержание общей серы — методом волнодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектрометрии на анализаторе серы Mini-Z (Rigaku). Содержание общего азота — методом высокотемпературного сжигания в среде кислорода с последующим хемилюминесцентным детектированием на анализаторе азота Antek 9000 (Antek). Фракционный состав газойля висбрекинга (191–332°C) исследовали микрометодом ASTM D7345-17\*\* с объемом пробы 10 мл с использованием автоматизированного аппарата микродистилляции PMD 110 (Instrumentation Scientifique de laboratoire).

Цетановые индексы (ЦИ) газойля висбрекинга и рафинатов рассчитывали в соответствии с ГОСТ 27768–88 «Топливо дизельное. Определение цетанового индекса расчетным методом» по формуле

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

где  $\rho$  — плотность при 15°C (г·см<sup>-3</sup>),  $t_{50}$  — температура выкипания 50 об% фракции при атмосферном давлении (°C).

\* ГОСТ 32511–2013 (EN 590:2009). Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. Diesel fuel EURO. Specifications.

\*\* ASTM D7345-17. Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure (Micro Distillation Method).

**Таблица 1**  
Характеристика газойля висбрекинга

Показатель	Метод испытания	Значение показателя
Показатель преломления $n_D^{20}$	—	1.4815
Плотность при 20°C, кг·м <sup>-3</sup>	ASTM D4052-18a «Стандартный метод определения плотности, относительной плотности и силы тяжести жидкостей с помощью цифрового плотномера»	856.6
Групповой углеводородный состав, мас%: н-алканы	МВИ 11-83 «Методика выполнения измерений массовой доли индивидуальных парафиновых углеводородов и их фракций в потоках и средах технологического процесса выделения н-парафинов (Парекс) хроматографическим методом»	12.26
бромное число, г Br <sub>2</sub> /100 г	ASTM D1159-01 «Стандартный метод определения бромного числа нефтяных дистиллятов и товарных алифатических олефинов потенциометрическим титрованием»	31
сумма аренов, в том числе: моноароматические углеводороды	ГОСТ EN12916 «Определение типов ароматических углеводородов в средних дистиллятах. Метод высокоэффективной жидкостной хроматографии с детектированием по коэффициенту рефракции»	33.8
полиароматические углеводороды		10.0
Содержание серы, мас%	ASTM D4294-16e1 «Стандартный метод определения содержания серы в нефти и нефтепродуктах с помощью энергодисперсионной рентгеновской люминесцентной спектроскопии»	1.896
Содержание азота, ppm	ASTM D5762-18a «Стандартный метод определения содержания азота в жидких углеводородах, нефти и нефтепродуктах с помощью хемилюминесценции введенного на лодочке материала»	380
Цетановый индекс	ГОСТ 27768 «Определение цетанового индекса расчетным методом»	37.2

*N,N*-Диметилформамид (х.ч., ООО «Экрос-Аналитика») не образует гомогенных азеотропов с компонентами газойля висбрекинга ароматического характера, что позволит проводить его регенерацию из экстрактной и рафинатной фаз ректификацией [11]. Кроме того, *N,N*-диметилформамид проявляет достаточно высокие групповую селективность по отношению к ароматическим углеводородам (отношение предельных коэффициентов активности гексана и бензола в *N,N*-диметилформамиде при 30°C составляет 11.7); хорошую растворяющую способность (величина, обратная предельному коэффициенту активности бензола в *N,N*-диметилформамиде, при 30°C равна 0.690); невысокую селективность по молекулярным массам (отношение предельных коэффициентов активности гептана и гексана в *N,N*-диметилформамиде составляет при 30°C 1.237), что

позволяет эффективно экстрагировать компоненты из фракций с широкими пределами кипения.\*

Четырехступенчатую противоточную экстракционную очистку газойля висбрекинга проводили в системе четырех термостатированных делительных воронок по классической схеме, моделирующей работу экстракционной колонны, при 40°C [12]. Четырехступенчатую экстракцию в перекрестном токе проводили при той же температуре с использованием *N,N*-диметилформамида на каждой ступени при заданном массовом соотношении экстрагента и сырья.

В качестве примера приведен материальный баланс противоточной экстракции при массовом со-

\* *Gmehling J., Menke J., Schiller M.* Activity Coefficients at Infinite Dilution. Pt 3. C<sub>1</sub>–C<sub>9</sub>. Frankfurt / Main: DECHEMA (Chemistry Data Series: V. 9), 1994. P. 1001–1003.

**Таблица 2**

Материальный баланс четырехступенчатой противоточной экстракции газойля висбрекинга при массовом соотношении N,N-диметилформамид:сырье = 0.4:1

Компонент	Исходная система		Рафинатная фаза		Экстрактная фаза	
	г	мас%	г	мас%	г	мас%
Сырье	70.1	71.38	53.0	90.28	17.1	43.3
N,N-Диметилформамид	28.1	28.62	5.7	9.72	22.4	56.7
Всего	98.2	100	58.7	100	39.5	100

**Таблица 3**

Характеристика рафинатов, полученных при различных массовых соотношениях N,N-диметилформамид:сырье четырехступенчатой экстракцией в перекрестном токе

Показатель	N,N-Диметилформамид:сырье		
	0.4:1	0.5:1	0.75:1
Выход рафината, мас%	44.8	36.0	33.7
Показатель преломления $n_D^{20}$	1.4570	1.4570	1.4530
Плотность при 20°C, кг·м <sup>-3</sup>	821.5	821.0	814.9
Содержание серы, мас%	0.691	0.604	0.369
Содержание азота, ppm	72	57	27
Содержание моноароматических углеводородов, мас%	12.1	12.0	7.6
Содержание полиароматических углеводородов, мас%	2.1	2.2	0.9
Бромное число, г Вг <sub>2</sub> /100 г	21.4	23.6	21.0
Степень извлечения, мас%:			
сернистых соединений	83.7	88.5	93.4
азотистых соединений	91.5	94.6	97.6
моноароматических углеводородов	77.2	81.8	89.2
полиароматических углеводородов	90.6	92.1	97.0
непредельных углеводородов	69.1	72.6	77.2

**Таблица 4**

Характеристика экстрактов, полученных при различных массовых соотношениях N,N-диметилформамид:сырье четырехступенчатой экстракцией в перекрестном токе

Показатель	N,N-Диметилформамид:сырье		
	0.4:1	0.5:1	0.75:1
Выход экстракта, мас%	55.2	64.0	66.3
Плотность при 20°C, кг·м <sup>-3</sup>	885.2	876.7	877.7
Содержание серы, мас%	2.87	2.63	2.65
Содержание азота, ppm	630	563	560
Содержание моноароматических углеводородов, мас%	33.2	30.5	31.8
Содержание полиароматических углеводородов, мас%	16.5	14.6	14.5
Бромное число, г Вг <sub>2</sub> /100 г	38.6	35.0	36.1

отношении N,N-диметилформамид:сырье = 0.4:1 (табл. 2). Удаление примесей экстрагента из рафинатной фазы проводили трехступенчатой реэкстракцией в перекрестном токе дистиллированной водой при

объемном соотношении к рафинатной фазе 2:1. Из экстрактной фазы N,N-диметилформамид отгоняли от экстракта вакуумной дистилляцией.

### Обсуждение результатов

Характеристика рафинатов и экстрактов, выделенных в результате экспериментов экстракции в перекрестном токе, представлена в табл. 3, 4. Наиболее высокая степень извлечения достигается для азотистых соединений, представленных в газойле висбрекинга гетероциклическими соединениями ароматического характера, которые образуют наиболее стабильные  $\pi$ -комплексы с молекулами *N,N*-диметилформамида, а гомологи индола и карбазола — еще и водородные связи. Степень извлечения полиароматических углеводородов превышает 90% даже при массовом соотношении *N,N*-диметилформамид:сырье 0.4:1. Более высокая степень извлечения полиароматических углеводородов по сравнению с моноароматическими углеводородами объясняется повышением электронодонорной способности аренов с увеличени-

ем числа ароматических циклов. Степень извлечения сернистых соединений ниже, чем полиароматических углеводородов, что обусловлено наличием в газойле не только гетероциклических сераорганических соединений ароматического характера, которые экстрагируются лучше, чем арены с тем же числом циклов, но и насыщенных сернистых соединений, неспособных к образованию  $\pi$ -комплексов и водородных связей с апротонными растворителями. Бромное число рафинатов снижается по сравнению с газойлем висбрекинга, но степень извлечения непредельных углеводородов, рассчитанная при допущении, что они представлены моноолефинами, ниже, чем моноароматических углеводородов, что объясняется их меньшей электронодонорной способностью и стабильностью  $\pi$ -комплексов с молекулами *N,N*-диметилформамида.

Недостатком многоступенчатой экстракции в перекрестном токе, обеспечивающей высокую степень

**Таблица 5**

Характеристика рафинатов и экстрактов, полученных при различных массовых отношениях *N,N*-диметилформамид:сырье четырехступенчатой противоточной экстракцией

Показатель	<i>N,N</i> -Диметилформамид:сырье		
	0.4:1	0.5:1	0.75:1
<b>Характеристика рафинатов</b>			
Выход рафината, мас%	75.6	73.1	60.9
Показатель преломления $n_D^{20}$	1.4650	1.4640	1.4625
Плотность при 20°C, кг·м <sup>-3</sup>	831.4	828.7	822.2
Содержание серы, мас%	1.31	1.06	0.731
Содержание азота, ppm	90	87	65
Содержание моноароматических углеводородов, мас%	19.1	19.0	15.5
Содержание полиароматических углеводородов, мас%	4.4	3.7	2.0
Бромное число, г Br <sub>2</sub> /100 г	27.8	27.5	27.3
Степень извлечения, мас%:			
сернистых соединений	47.8	59.1	76.5
азотистых соединений	82.1	83.3	89.6
моноароматических углеводородов	39.3	41.7	60.3
полиароматических углеводородов	66.7	73.0	87.8
непредельных углеводородов	32.2	35.2	46.4
Цетановый индекс	51.5	52.4	54.8
<b>Характеристика экстрактов</b>			
Выход экстракта, мас%	24.4	26.9	39.1
Плотность при 20°C, кг·м <sup>-3</sup>	935.0	932.4	921.3
Содержание серы, мас%	3.70	4.15	3.75
Содержание азота, ppm	1280	1180	827
Содержание моноароматических углеводородов, мас%	38.5	36.8	36.7
Содержание полиароматических углеводородов, мас%	27.4	27.0	22.7

Таблица 6

Характеристика рафинатов, полученных одноступенчатой экстракцией N,N-диметилформамидом и экстракционной системой N,N-диметилформамид–гептан

Показатель	N,N-Диметилформамид	N,N-Диметилформамид–гептан
Массовое соотношение:		
N,N-диметилформамид:сырье	0.75:1	0.7:1
гептан:сырье	—	0.3
Выход рафината, мас%	79.04	89.0
Показатель преломления $n_D^{20}$	1.4675	1.4670
Плотность при 20°C, кг·м <sup>-3</sup>	841.5	824.7
Содержание серы, мас%	1.32	1.30
Содержание азота, ppm	239	192
Содержание полиароматических углеводородов, мас%	3.9	6.3
Степень извлечения, мас%:		
сернистых соединений	45.0	39.0
азотистых соединений	50.3	55.0
полиароматических углеводородов	69.2	44.0

извлечения из газойля висбрекинга нежелательных компонентов, является низкий выход рафината, вследствие чего в промышленности применяется в основном противоточная экстракция.

Характеристика рафинатов и экстрактов, полученных при четырехступенчатой противоточной экстракции, приведена в табл. 5. Выход рафинатов при переходе от экстракции в перекрестном токе к противоточному процессу повышается на 30 мас% и более, однако качество рафинатов, как и следовало ожидать, снижается. Последовательность групп экстрагируемых компонентов по степени извлечения сохраняется такой же: азотистые соединения > полиароматические углеводороды > сернистые соединения > моноароматические углеводороды > непредельные углеводороды.

О снижении содержания соединений ароматического характера в рафинатах свидетельствуют пониженные по сравнению с сырьем значения показателей преломления, плотности.

Важное преимущество процесса экстракции перед гидроочисткой — значительное увеличение цетанового индекса рафинатов — на 14–17.5 цетановой единицы по сравнению с газойлем висбрекинга. Это также следствие удаления полициклоаренов, характеризующихся отрицательными цетановыми числами, при гидрировании которых цетановые числа циклоалканов возрастают незначительно.

Даже при низком массовом соотношении N,N-диметилформамида и газойля висбрекинга (0.4–0.5):1 степень извлечения сернистых соединений составляет 50–60%. При экстракционной очистке

прямогонных дизельных фракций для достижения таких показателей обессеривания требуется отношение экстрагентов к сырью в 5–8 раз более высокое [13]. Это объясняется преобладанием в газойле висбрекинга голоядерных сераорганических соединений ароматического характера (или с короткими алкильными заместителями), которые сравнительно легко экстрагируются, как и аналогичные полициклоарены и азотсодержащие гетероциклические соединения.

При близких показателях обессеривания и деазотирования использование экстракционной системы, включающей неполярный растворитель, позволяет повысить выход рафината на 10 мас% (табл. 6). Гептан, плохо растворимый в N,N-диметилформамиде, концентрируется в рафинатной фазе и образует с насыщенными углеводородами системы, близкие к идеальным, а с гетероатомными компонентами — неидеальные системы с положительными отклонениями от закона Рауля. Содержание насыщенных углеводородов в рафинатной фазе повышается, а в экстрактной фазе снижается, что приводит к увеличению коэффициентов разделения и выхода рафината.

## Выводы

Четырехступенчатая противоточная экстракционная очистка газойля висбрекинга при невысоких массовых соотношениях N,N-диметилформамида и сырья (0.4–0.5):1 обеспечивает степень извлечения азотистых компонентов, полиароматических углево-

дородов и сернистых соединений на уровне 82–83, 67–73 и 48–59 мас% соответственно при выходе рафината 73–76 мас%. Повышение выхода рафината возможно при использовании экстракционной системы, включающей кроме N,N-диметилформамида неполярный растворитель, например гептан.

### Конфликт интересов

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

### Информация о вкладе авторов

А. В. Камешков – постановка задач и плана исследования и участие в обсуждении результатов; А. А. Гайле — написание текста статьи; М. Ахмад — сбор литературных данных, анализ сырья; А. Р. Воробьева — проведение экстракционных экспериментов и теоретических расчетов; П. Ю. Башмаков — анализ полученных продуктов.

### Информация об авторах

*Камешков Алексей Викторович*, к.т.н., директор технический ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6542-2798>

*Гайле Александр Александрович*, д.х.н., проф., профессор кафедры технологии нефтехимических и углехимических производств, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1897-8053>

*Ахмад Мария*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0412-8373>

*Воробьева Анастасия Романовна*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1997-4089>

*Башмаков Павел Юрьевич*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8586-7919>

### Список литературы

- [1] *Солодова Н. А., Емельянычева Е. А.* Висбрекинг. Казань: Изд-во КНИТУ, 2014. С. 12.
- [2] *Seki H., Kamata F.* Structural change of petroleum asphaltenes and resins by hydrodemetallization // *Energy and Fuels*. 2000. V.14. N 5. P. 980–985. <https://doi.org/10.1021/ef000009m>
- [3] *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. P. 1–68. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.05.011>
- [4] *Van der Berg J. P., Lucien J. P., Germaine G., Thielemans G. L. B.* Deep desulphurization and aromatics saturation for automotive gasoil manufacturing // *Fuel Proc. Technol.* 1993. V. 35. P. 119–136. [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(93\)90088-L](https://doi.org/10.1016/0378-3820(93)90088-L)
- [5] *Виноградова Н. Я., Гуляева Л. А., Хавкин В. А.* О современных технологиях глубокой гидроочистки дизельных топлив // *Технология нефти и газа*. 2008. № 1. С. 4–9.
- [6] *Верещагин А. В., Гайле А. А., Клементьев В. Н., Землянский О. В., Бедда К.* Фазовые равновесия жидкость–жидкость в трехкомпонентных системах н-ундекан–арен (или гетероциклическое соединение)–N,N-диметилформамид // *Нефтеперераб. и нефтехимия*. 2017. № 10. С. 29–37.
- [7] *Шишкин С. Н., Гайле А. А., Бакаушина Д. А., Кузичкин Н. В.* Экстракционная очистка легкого газойля висбрекинга // *ЖПХ*. 2013. Т. 86. № 5. С. 707–710 [*Shishkin S. N., Gaile A. A., Bakaushina D. A., Kuzichkin N. V.* Extractive purification of light visbreaker gasoil // *Russ. J. Appl. Chem.* 2013. V. 86. N 5. P. 654–657. <https://doi.org/10.1134/S1070427213050078>].
- [8] *Паус М. А., Бондаренко М. Ф., Абрамович З. И., Круглов Э. А.* Коэффициенты активности сернистых соединений в различных экстрагентах // *Нефтехимия*. 1975. Т. 15. № 4. С. 626–629.
- [9] *Бондаренко М. Ф., Паус М. А., Абрамович З. И.* Получение концентратов сульфидов из дистиллятов нефти экстракцией органическими растворителями // *Нефтехимия*. 1977. Т. 17. № 6. С. 904–909.
- [10] *Камешков А. В., Гайле А. А., Кузичкин Н. В., Хасанова А. А.* Экстракционная очистка атмосферного газойля смешанными экстрагентами и экстракционными системами, включающими неполярный растворитель // *Нефтеперераб. и нефтехимия*. 2015. № 12. С. 3–6.
- [11] *Камешков А. В., Гайле А. А., Клементьев В. Н., Воробьева А. Р.* Образование азеотропных смесей диметилформамида с углеводородами // *Нефтеперераб. и нефтехимия*. 2021. № 1. С. 9–12.
- [12] *Альдерс Л.* Жидкостная экстракция. М.: ИЛ, 1969. С. 125.
- [13] *Гайле А. А., Верещагин А. В., Клементьев В. Н.* Облагораживание дизельных и судовых топлив экстракционными и комбинированными методами. Ч. 2. Использование органических растворителей в качестве экстрагентов (обзор) // *ЖПХ*. 2019. Т. 92. № 5. С. 547–559. <https://doi.org/10.1134/S0044461819050013> [*Gaile A. A., Klement'ev V. N., Vereshchagin A. V.* Refining of diesel and ship fuels by extraction and combined methods. Part 2. Use of organic solvents as extractants // *Russ. J. Appl. Chem.* 2019. V. 92. N 5. P. 583–595. <https://doi.org/10.1134/S107042721905001X>].