

УДК 665.7.035

DOI: 10.15372/KhUR2024559

EDN: YSKNSZ

Новые компоненты топлива маловязкого судового на базе малоценных и побочных продуктов нефтепереработки

С. Г. ДЬЯЧКОВА¹, Ж. Н. АРТЕМЬЕВА²¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия²АО «Ангарская нефтехимическая компания», Ангарск, Россия

E-mail: ArtemevaZN@anhk.rosneft.ru

(Поступила 17.10.2023; после доработки 21.11.2023; принята к печати 22.12.2023)

Аннотация

Проведено комплексное исследование углеводородного состава и физико-химических свойств побочных продуктов нефтепереработки и нефтехимии с целью поиска новых низкомаржинальных компонентов топлива маловязкого судового (ТМС) и оптимизации состава композиций топлива для расширения сырьевой базы ТМС. Установлена возможность вовлечения в ТМС утяжеленных фракций первичной и вторичной переработки нефти: 10–12 % утяжеленной дизельной фракции, 47–60 % прямогонной среднестиллятной фракции, 2–10 % тяжелой дизельной фракции, 35 % вакуумного дистиллята, 10 % кубового остатка блоков гидрирования, 4–10 % легкого газойля каталитического крекинга. Найден способ получения нового компонента ТМС – фракции с пределами выкипания 180–270 °С, полученной из отходов нефтепереработки после их обезвоживания и фракционирования с выходом до 30 %, вовлечение которой в ТМС в количестве 5 % даст экономический эффект около 7 млн руб. в год. Методом математического моделирования проведена оптимизация состава топлива из основных и побочных продуктов с учетом объемов производства и фактических значений критических показателей каждого компонента.

Ключевые слова: топливо маловязкое судовое, прямогонные среднестиллятные фракции, легкий газойль каталитического крекинга, дизельные фракции, легкий газойль замедленного коксования, вакуумные дистилляты

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире происходит стремительное ужесточение требований к качеству нефтепродуктов, что связано с необходимостью стабилизации экологической обстановки [1–5]. Наряду с этим, важным приоритетом в развитии нефтеперерабатывающей промышленности остается увеличение глубины переработки нефти [6–8]. Одним из востребованных продуктов нефтепереработки как в России, так и за рубежом является топливо маловязкое судовое (ТМС), используемое в судовых энергетических установ-

ках. Для ТМС, в отличие от дизельного топлива, установлены не такие жесткие ограничения по плотности, вязкости, массовой доле серы, йодному числу, в европейских спецификациях нормируется более низкий цетановый индекс. По предварительному прогнозу мировое потребление судовых топлив к 2050 г. увеличится примерно в 1.1–1.5 раза [9, 10]. Как правило, в качестве компонентов ТМС используют дистиллятные фракции прямой и вторичной переработки нефти и газовых конденсатов, большинство из которых могут являться компонентами более высокомаржинальных, чем ТМС, нефте-

продуктов [6, 11, 12]. Поэтому разработка новых рецептур ТМС с заменой ценных компонентов на доступное нефтяное сырье может решить одну из актуальных проблем нефтепереработки.

Цель настоящей работы – поиск новых низкомаржинальных компонентов ТМС среди малощенных и побочных продуктов нефтеперерабатывающих производств, оптимизация состава топлива и расширение сырьевой базы ТМС за счет вовлечения этих компонентов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования служили компоненты ТМС, ранее используемые в производстве, а именно:

- прямогонные среднестиллятные фракции (ПСДФ), в том числе утяжеленного фракционного состава, получаемые в процессе атмосферной перегонки обессоленной нефти;
- легкий газойль, получаемый в процессе каталитического крекинга смеси вакуумных дистиллятов (ЛГКК);
- гидроочищенные среднестиллятные фракции (ГСДФ), получаемые в процессе гидроочистки смеси дизельных фракций различного происхождения с бензином замедленного коксования;
- кубовый остаток (КО), получаемый в процессе атмосферно-вакуумной перегонки гидрогенизата блоков гидрирования тяжелых среднестиллятных фракций первичной и вторичной переработки нефти;

– дизельная фракция, получаемая в процессе замедленного коксования смеси гудрона, тяжелого газойля каталитического крекинга и тяжелой смолы пиролиза (ДФЗК).

Было изучено углеводородное сырье, которое в настоящее время направляется на производство низкомаржинальной продукции, остаточных топлив и мазута: утяжеленные дизельные фракции (УДФ) с вакуумных колонн установок (уст.) АВТ-6 и ГК-3; легкий газойль замедленного коксования (ЛГЗК); тяжелая дизельная фракция с атмосферной колонны установки ГК-3 (ТДФ); вакуумные дистилляты (ВД); ловушечный нефтепродукт (ЛН); среднестиллятная фракция, получаемая в процессе атмосферной перегонки ловушечного продукта (СДФЛ), а также ТМС нового компонентного состава.

Отбор исходных компонентов, используемых для компаундирования лабораторных образцов, проводился по ГОСТ 2517 “Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб”.

Моделирование рецептур топлив и оценку экономического эффекта выполняли с использованием программного обеспечения Aspen PIMS (Process Industry Modeling System) – экономико-технологической системы моделирования нефтепереработки.

В табл. 1 приведены стандартизованные методики определения характеристик нефтепродуктов и современные физико-химические методы исследования, которые применялись для испытаний исходных, целевых и промежуточных продуктов.

ТАБЛИЦА 1

Методы, используемые для оценки физико-химических показателей объектов исследования

№ п/п	Показатель	Метод испытания
1	Температура застывания	ГОСТ 20287 (метод Б)
2	Вязкость кинематическая	ГОСТ 33
3	Массовая доля серы	ГОСТ Р 51947 (рентгенофлуоресцентная спектрометрия, анализатор Lab-X3500)
4	Плотность при 15°C	ГОСТ Р 51069
5	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле	ГОСТ ISO 2719
6	Содержание непредельных углеводородов (НУВ)	п. 1.4.4 ГОСТ 2070 (титриметрический метод)
7	Содержание ароматических углеводородов (АУВ)	ГОСТ EN 12916 (высокоэффективная жидкостная хроматография, жидкостной хроматограф ProStar с рефрактометрическим детектором) + газожидкостная хроматография, газовый хроматограф SHIMADZU “GC-2014” с капиллярными колонками GsBP-1msc
8	Содержание парафино-нафтеновых углеводородов	Газожидкостная хроматография + нормализация (100 % – (НУВ + АУВ))
9	Фракционный состав	ГОСТ 2177

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В продолжение наших исследований по расширению сырьевой базы топлива судового маловязкого [13–15] нами осуществлен поиск новых компонентов ТМС. На базе комплексного исследования углеводородного состава и физико-химических свойств низкомаржинальных тяжелых и средних дистиллятов и побочных продуктов нефтепереработки установлено, что для таких нефтепродуктов, как УДФ, ЛГЗК, ТДФ и ВД, физико-химические и эксплуатационные свойства близки к области нормируемых показателей ТМС. Эти свойства могут легко корректироваться добавками либо оптимизацией состава ТМС, следовательно, вовлечение вышеперечисленных компонентов не приведет к значитель-

ным отклонениям в рецептуре ТМС (табл. 2). Критичными показателями для компонентов топлива являются плотность при 15 °С, массовая доля серы, вязкость кинематическая при 20 °С и температура застывания.

Показано, что при выведении из рецептуры ТМС компонентов ПСДФ уст. ГК-3, ГСДФ и ДФЗК, количество парафино-нафтенных углеводородов в топливе компенсируется за счет вовлечения УДФ и ВД, а также увеличения содержания ПСДФ уст. АВТ-6 и КО (см. табл. 2). Подобная замена компонентов обеспечивает сохранение температурных характеристик, вязкости и воспламеняемости ТМС нового состава, поскольку увеличение содержания в топливе высококипящего компонента КО приводит к повышению значений вязкости, температур вспышки

ТАБЛИЦА 2

Физико-химические показатели и углеводородный состав компонентов, используемых в приготовлении топлива маловязкого судового (ТМС)

Компонент ТМС	Физико-химический показатель									
	Плотность при 15 °С, кг/м ³	Массовая доля серы, %	Температура застывания, °С	Температура вспышки в закрытом тигле, °С	Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	Температура начала кипения, °С	Температура конца кипения, °С	Содержание неопределенных углеводородов, мас. %	Содержание ароматических углеводородов, мас. %	Содержание парафино-нафтенных углеводородов, мас. %
ТМС (нормируемое значение по ТУ 38.101567-2014)										
	≤893	вид I – ≤0.5 вид II – ≤1.0	≤-10	≥61	≤11.4	Не норм.	Не норм.	Не норм.	Не норм.	Не норм.
Экспериментальное значение										
ГСДФ ^а	841	0.0009	-17	60	4.5	161	355	0.4	24.2	75.4
ДФЗК ^а	852	0.59	-50	59	1.9	170	317	35.0	30.3	34.7
ПСДФ										
уст. ГК-3 ^а	851	0.31	-19	82	5.3	201	355	0.9	31.5	67.6
уст. АВТ-6 ^{а,б}	869	0.49	-3	85	11.4	185	358	1.3	35.0	63.7
ЛГКК ^{а,б}	946	1.16	-46	71	2.8	182	339	9.8	76.5	13.7
КО ^{а,б}	833	0.0001	0	146	10.8	270	349	0.7	1.9	97.4
ЛГЗК ^б	899	1.03	-4	109	11.0	234	394	23.1	44.9	32.0
ТДФ ^б	870	0.5	-4	91	11.8	220	373	1.4	34.6	64.0
УДФ										
уст. ГК-3 ^б	861	0.37	-27	85	4.5	218	368	2.2	38.8	59.0
уст. АВТ-6 ^б	892	0.67	13	132	26.8	274	390	3.5	39.5	57.0
ВД ^б	903	0.71	11	169	28.7	320	413	3.2	44.4	52.4
СДФЛ ^б	829	0.25	-59	47	1.8	183	269	3.8	35.6	60.6

Примечание. Здесь и в табл. 3: ГСДФ – гидроочищенные среднестиллятные фракции; ДФЗК – дизельная фракция замедленного коксования; ПСДФ – прямогонные среднестиллятные фракции; ЛГКК – легкий газойль каталитического крекинга; КО – кубовый остаток; ЛГЗК – легкий газойль замедленного коксования; ТДФ – тяжелая дизельная фракция; УДФ – утяжеленные дизельные фракции; ВД – вакуумные дистилляты; СДФЛ – среднестиллятные фракции ловушечного нефтепродукта; уст. – установка.

^а Компоненты для приготовления ТМС, используемые по технологии до 2016 г.

^б Компоненты новых рецептур.

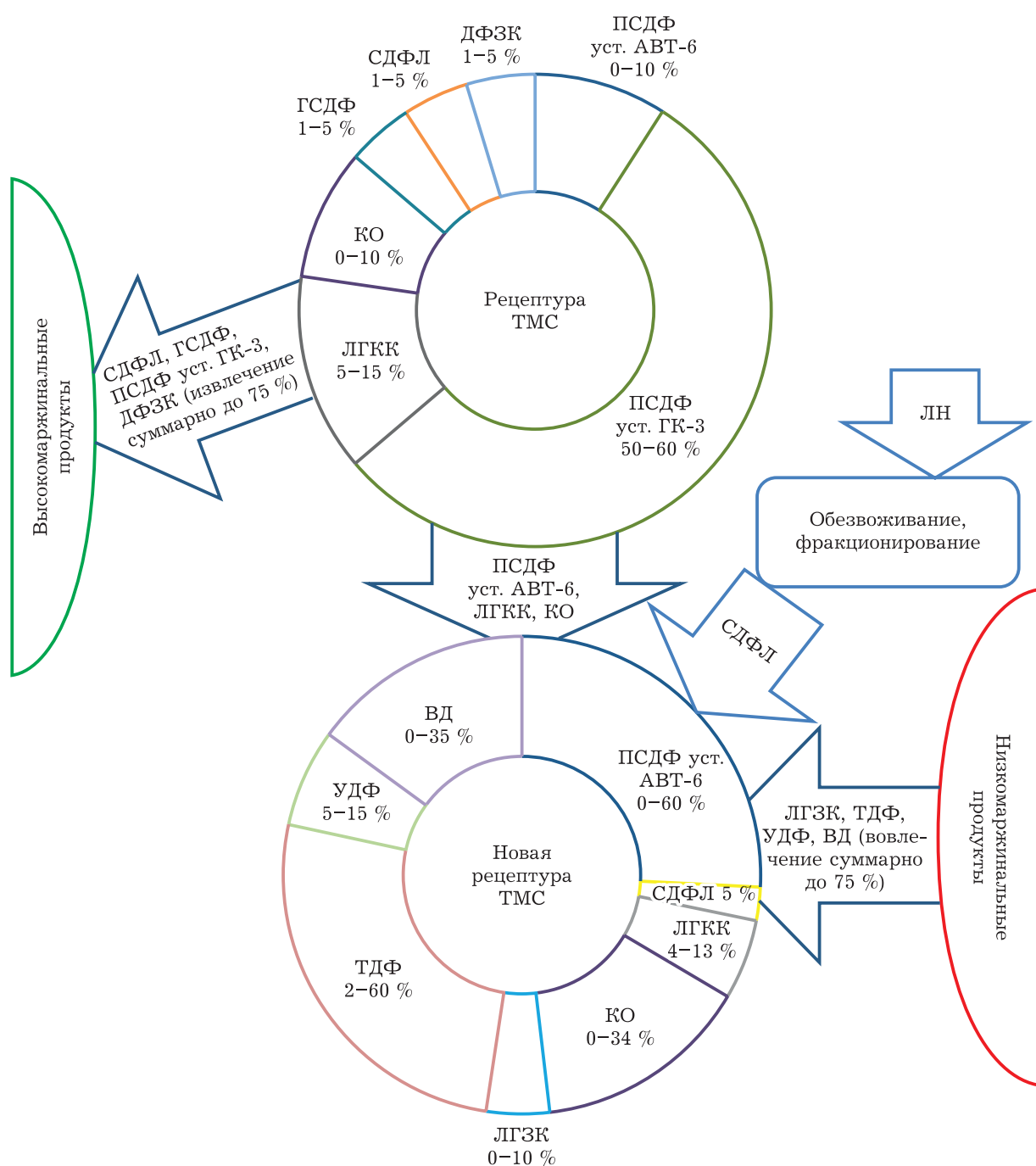


Рис. 1. Схема корректировки рецептуры топлива маловязкого судового (ТМС). СДФЛ – среднедистиллятные фракции ловушечного нефтепродукта; ГСДФ – гидроочищенные среднедистиллятные фракции; ПСДФ – прямогонные среднедистиллятные фракции; ДФЗК – дизельная фракция замедленного коксования; КО – кубовый остаток; ЛГКК – легкий газойль каталитического крекинга; ЛГЗК – легкий газойль замедленного коксования; ЛН – ловушечный нефтепродукт; ТДФ – тяжелая дизельная фракция; УДФ – утяжеленные дизельные фракции; ВД – вакуумные дистилляты; уст. – установка.

и застывания топлива. Известно, что низкокипящие фракции приводят к снижению температуры вспышки, а высококипящие, напротив, повышая температуру вспышки, увеличивают и температуру застывания [6, 16–20]. При анализе полученных результатов очевидно, что рост содержания в топливе компонентов ГСДФ и ДФЗК

приведет к понижению температуры вспышки ТМС, поэтому их удаление из рецептуры топлива необходимо не только по показателям снижения себестоимости ТМС, но и с точки зрения оптимизации эксплуатационных показателей. В то же время по мере утяжеления фракционного состава вовлекаемых продуктов (ТДФ

ТАБЛИЦА 3

Компонентный состав (мас. %) новых рецептур композиций топлива маловязкого судового (ТМС)

Компонент	Композиция ^а						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
ПСДФ уст. АВТ-6	31	8	5	—	60	60	47
КО	26	34	30	19	8	10	—
ЛГКК	13	8	5	6	10	10	4
УДФ уст. ГК-3	5	15	11	—	10	10	—
УДФ уст. АВТ-6	—	—	—	15	—	—	12
ЛГЗК	—	5	9	—	2	—	—
ТДФ	25	25	36	60	10	10	2
ВД	—	5	4	—	—	—	35

Примечание. Прочерк — компонент отсутствует в композиции. Обозначения компонентов см. табл. 2.

^а Указаны составы ТМС, включающие только тяжелые дистилляты.

($T_{\text{КК}} = 373 \text{ }^{\circ}\text{C}$), УДФ ($T_{\text{КК}} = 390 \text{ }^{\circ}\text{C}$), ЛГЗК ($T_{\text{КК}} = 394 \text{ }^{\circ}\text{C}$, где $T_{\text{КК}}$ — температура конца кипения) увеличивается содержание в них тяжелых парафинов, серосодержащих соединений, растет плотность, вязкость и температура застывания самих компонентов. Снижение содержания ароматических углеводородов при выводе из состава ТМС таких компонентов, как ПСДФ уст. ГК-3, ДФЗК и ГСДФ, компенсируется вовлечением в топливо ТДФ, УДФ и ВД, а также увеличением доли ПСДФ уст. АВТ-6 (см. табл. 2).

Ловушечный нефтепродукт — неизбежный побочный продукт нефтеперерабатывающей промышленности. Он формируется за счет дреннирования подтоварных вод из резервуаров и оборудования, возможных проливов нефтепродуктов из железнодорожных цистерн. Поскольку ЛН, с одной стороны, представляет собой экологическую опасность, а с другой — является источником ценных углеводородов, актуальной становится задача извлечения из него нефтесодержащей фракции для дальнейшего практического использования.

Установлено [21], что ЛН представляет собой устойчивую водонефтяную эмульсию (содержание воды до 60 %), органическая фаза которой на 50 об. % состоит из бензиновых фракций с преобладанием в них парафино-нафтеновых углеводородов (75 об. %). Вовлечение в ТМС ловушечного нефтепродукта невозможно, поскольку при введении его в количестве 1 мас. % происходит увеличение цвета на 4 ед. и составляет 5.5 ед. в конечном продукте. Данный показатель, несмотря на отсутствие нормируемого значения в ТУ 38.101567-2014, критичен для конечного потребителя, которым заявлено норми-

руемое значение (не более 2.5 ед.). Также следует отметить, что вовлечение ЛН без предварительной подготовки в ТМС оказывает негативное влияние на коксуемость и увеличивает ее до предельного значения.

Нами разработан способ получения нового компонента ТМС — фракции с пределами выкипания 180–270 $^{\circ}\text{C}$ (СДФЛ), полученной из ЛН после его обезвоживания и фракционирования с выходом до 30 %, вовлечение которой в ТМС (5 %) не приведет к ухудшению нормативных показателей топлива и обеспечит экономический эффект около 7 млн руб. при производстве 192 тыс. т ТМС в год (расчет в программе Aspen PIMS). Схема корректировки рецептуры ТМС приведена на рис. 1.

Учитывая ожидаемые ограничения при вовлечении предложенных нами тяжелых дистиллятов первичного и вторичного происхождения, методом математического моделирования с использованием программного продукта PIMS найдены приемлемые по составу и качеству композиции ТМС (табл. 3, 4). Для определения состава топлива, отвечающего требованиям ТУ 38.101567-2014, в качестве необходимых параметров расчета в программу PIMS были введены фактические значения критических показателей (вязкость, плотность, массовая доля серы) и объемы производства каждого компонента. Температурой застывания на данном этапе пренебрегли, поскольку данная характеристика может быть скорректирована применением депрессорно-диспергирующих присадок.

Показано, что эксплуатационные характеристики топлив, приготовленных согласно рецептурам № 1–7 с применением метода математи-

ТАБЛИЦА 4

Эксплуатационные характеристики новых рецептур композиций топлива маловязкого судового (ТМС)

Эксплуатационная характеристика	Норма по ТУ 38.101567-2014	Расчетное значение / фактическое значение ^а для композиции						
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	Не более 114	9.9 / 9.2	10.4 / 10.3	10.8 / 10.6	11.6 / 11.3	9.8 / 10.5	9.8 / 10.1	11.9 / 11.4
Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С	Не ниже 61	101 / 98	112 / 111	110 / 108	106 / 106	90 / 93	90 / 97	104 / 100
Температура застывания, °С	Не выше -10	- / -2	- / -2	- / -2	- / -1	- / 3	- / 4	- / 5
Плотность при 15 °С, кг/м ³	Не более 893	870 / 869	875 / 872	876 / 873	871 / 871	874 / 880	872 / 875	887 / 884
Массовая доля серы, %	Не более 0.5	0.45 / 0.47	0.40 / 0.48	0.42 / 0.49	0.47 / 0.49	0.50 / 0.48	0.50 / 0.47	0.52 / 0.49

Примечание. Прочерк – значение показателя не рассчитывалось.

^а Приведены фактические значения топливных композиций без добавления в рецептуру депрессорно-диспергирующих присадок.

ческого моделирования, хорошо коррелируют с расчетными данными и находятся в области регламентируемых ТУ 38.101567-2014 нормативов (см. табл. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе комплексного анализа компонентного состава и методов математического моделирования предложен новый подход к расширению сырьевой базы ТМС за счет вовлечения средних и тяжелых дистиллятов, представляющих собой малоценные побочные продукты нефтепереработки. Разработаны новые рецептуры ТМС, позволяющие исключить из производства высокомаржинальные компоненты и заменить их на менее ценные продукты. Впервые показано, что увеличение содержания компонентов ПСДФ уст. АВТ-6 и КО с 10 до 60 и с 10 до 34 % соответственно и вовлечение в ТМС фракций УДФ, ТДФ, ВД, ЛГЗК и СДФЛ (до 15, 60, 35, 10 и 5 % соответственно), ранее используемых в приготовлении менее ценных топлив, позволяют расширить сырьевую базу ТМС за счет тяжелых дистиллятов и вывести до 70 % фракций ПСДФ уст. ГК-З, ГСДФ и ДФЗК в приготовление высокомаржинальных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кондрашева Н. К., Ахметов А. Ф. Судовые топлива. Уфа: Гилем, 2001. 142 с.
- Tonkonog V. V. Analysis of the movement of ship supplies on the example of the Novorossiysk sea checkpoint // Labour and Social Relations Journal. 2022. Vol. 33, No. 5. P. 60–69.
- Митусова Т. Н., Булатников В. В., Бобкова М. В., Ширякина Е. И. Новый российский стандарт на судовые топлива // Мир нефтепродуктов. Вест. нефтяных компаний. 2011. № 4. С. 31–33.
- О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту [Электронный ресурс] : технический регламент Таможенного союза : ТР ТС 013/2011 (с изм. на 24 нояб. 2023 г.). Доступ из электрон. фонда правовых и нормативно-техн. док. «КОДЕКС». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902307833> (дата обращения: 21.02.2023).
- Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов [Электронный ресурс] : прил. 4 (пересм.) к Междунар. конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, изм. Протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ 73/78). Доступ из электрон. фонда правовых и нормативно-техн. док. «КОДЕКС». URL: <https://docs.cntd.ru/document/499014496> (дата обращения: 21.02.2023).
- Элверс Б., Альфке Г., Бишоп Д. Д., Вотсмейер М. Топлива. Производство, применение, свойства : справочник. СПб.: Профессия, 2012. 413 с.
- Кондрашева Н. К., Кондрашев Д. О. Основные направления совершенствования технологии производства дизельных и судовых маловязких топлив // Технологии нефти и газа. 2014. № 3. С. 3–9.
- Титов А. Тревожное будущее судовых топлив // Нефтегазовая вертикаль. 2017. № 9. С. 20–22.
- Катюха П. Б., Цветков П. В. Географическое распределение поставок бункерного топлива на мировом углеводородном рынке (часть 1) // Нефть, газ и бизнес. 2017. № 10. С. 53–56.
- Холопов К. В., Соколова О. В. Бункерный рынок и бункерные операции как фактор обеспечения международного морского судоходства // Российский внешнеэкон. вестн. 2015. № 7. С. 98–114.
- Митусова Т. Н., Лобашова М. М., Ершов М. А., Бобкова М. В., Титаренко М. А. Судовые топлива: изменения в стандарте // Мир нефтепродуктов. Вестн. нефтяных компаний. 2018. № 11. С. 44–48.
- Данилов А. М. Применение присадок в топливах : справочник. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2010. 367 с.
- Артемьева Ж. Н., Соболева В. Э., Дьячкова С. Г. Топлива маловязкие судовые, отвечающие требованиям ТР ТС 013/2011 в редакции 2020 года // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов : материалы X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Иркутск, 22–24 апреля 2020 г.). Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2020. С. 137–139.
- Артемьева Ж. Н., Дьячкова С. Г., Кузора И. Е., Вакульская Т. И., Павлов Д. В., Лонин М. А. Топливо судовое

- маловязкое на базе тяжелых дизельных фракций вторичного происхождения. Проблемы и методы их решения // Нефтехимия. 2020. Т. 60, № 5. С. 715–723.
- 15 Артемьева Ж. Н., Кузора И. Е., Гершпигель Т. Н., Дьячкова С. Г., Вакульская Т. И., Павлов Д. В. Дистилляты процесса коксования – новые компоненты топлива судового маловязкого // Хим. пром-сть сегодня. 2021. № 4. С. 18–21.
- 16 Папок К. К., Рагозин Н. А. Словарь по топливам, маслам, присадкам и специальным жидкостям : химмотол. словарь. 4-е изд. М.: Химия, 1975. 392 с.
- 17 Капустин В. М. Технология переработки нефти : учеб. пособие : в 4 ч. Ч. 1. Первичная переработка нефти. М.: КолосС, 2012. 452 с.
- 18 Моторные, реактивные и ракетные топлива / под ред. К. К. Папок, Е. Г. Семенидо. 4-е изд. М.: Гостоптехиздат, 1962. 741 с.
- 19 Гуревич И. Л. Технология переработки нефти и газа : учебник. Ч. 1. Общие свойства и первичные методы переработки нефти и газа. М.: Химия, 1972. 359 с.
- 20 Капустин В. М., Гуреев А. А. Технология переработки нефти : учеб. пособие : в 2 ч. Ч. 2. Физико-химические процессы. М.: Химия, 2015. 400 с.
- 21 Артемьева Ж. Н., Дьячкова С. Г., Кузора И. Е., Лонин М. А. Оценка возможности использования ловушечного нефтепродукта как компонента для приготовления средних и тяжелых дистиллятов // Нефтепереработка и нефтехимия. 2019. № 5. С. 3–9.