

ПЕРЕРАБОТКА МАЗУТА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Дмитрий Витальевич Аврамов¹, канд. техн. наук (dvavramov@gmail.com)

Михаил Михайлович Родионов¹ (dvavramov@gmail.com)

Валентин Всеволодович Васильев^{2,3}, докт. техн. наук, проф. (vasvalvs@mail.ru)

Елена Валентиновна Саламатова², канд. техн. наук (salelena@rambler.ru)

¹ ООО НПФ «ЭлектроГидроДинамика», Санкт-Петербург, 197136. Россия

² Санкт-Петербургский государственный горный университет, Санкт-Петербург, 199106. Россия

³ Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, 191023. Россия

Аннотация. Предложено использовать плазмохимический метод для переработки мазута на установке производительностью 1000 кг/ч. Показано, что при неглубокой плазмохимической обработке происходит значительный крекинг высококипящей части мазута. При переработке мазута плазмохимическим методом с последующей отгонкой жидких продуктов получается, %: газа 6,7; остатка 48,0; сольвента 11,2 (от начала кипения (н.к.) до 250 °С) и печного топлива 34,1 (251–360 °С). Из печного топлива разгонкой получено, %: 0,3 – газа; 30,2 – судового маловязкого топлива СМТ (251–330 °С) и 3,6 – мазута Ф-5 (331–360 °С). Образовавшийся остаток с пенетрацией 150 дмм и температурой размягчения по кольцу и шару (КиШ) 73 °С можно использовать в качестве компонента дорожного битума и сырья замедленного коксования. Суммарный расход электроэнергии на плазмохимическую переработку 1000 кг мазута составляет около 30–40 кВт (в том числе на работу плазмохимического реактора 6–8 кВт)

Ключевые слова: мазут, плазмохимия, хромато-масс-спектрометрия, ИК-спектроскопия

PROCESSING OF FIELD OIL BY PLASMOCHEMICAL METHOD

Dmitriy V. Avramov¹, **Mikhail M. Rodionov**¹, **Valentin V. Vasilyev**^{2,3}, **Elena V. Salamatova**²

¹ ElektroGidroDinamika, Saint Petersburg. Russia

² Saint Petersburg State Mining University of Empress Catherine II, Saint Petersburg. Russia

³ Saint Petersburg State University of Economics (UNECON), Saint Petersburg. Russia

Abstract. It is proposed to use the plasma-chemical method for processing fuel oil in an installation with a capacity of 1000 kg/h. It has been shown that with shallow plasma-chemical treatment, significant cracking of the high-boiling part of the fuel oil occurs. When processing fuel oil using the plasma-chemical method followed by distillation of liquid products, the following is obtained: 6,7 % of gas; 48,0 % of residue; 11,2 % of solvent (n.k.–250 °C) and 34,1 % of heating oil (251–360 °C). The following percentages were obtained from heating oil by distillation: 0,3 – gas; 30,2 – low-viscosity marine fuel SMT (251–330 °C) and 3,6 – fuel oil F-5 (331–360 °C). The resulting residue with a penetration of 150 dmm and a ring and ball softening temperature (S&T) of 73 °C can be used as a component of road bitumen and delayed coking raw materials. The total energy consumption for plasma-chemical processing of 1000 kg of fuel oil is about 30–40 kW (including the operation of a 6–8 kW plasma-chemical reactor).

Keywords: fuel oil, plasma chemistry, gas chromatography-mass spectrometry, IR spectroscopy

Традиционными способами переработки мазутов, полученных при атмосферной разгонке на установках АТ, являются: вакуумная разгонка, с последующей переработкой гудрона и фракций методами висбрекинга, каталитического крекинга, гидрокрекинга, термического крекинга и замедленного коксования. При вакуумной разгонке мазута западносибирской нефти обычно получают 3 % легкого вакуумного газойля в диапазоне

температур от начала кипения (н.к.) до 350 °С, вакуумный газойль ~42 % (351–500 °С) и гудрон – 55 % [1–6].

Наиболее ценными являются светлые фракции нефти, выкипающие при атмосферном давлении до 360 °С. Для получения товарных высококачественных продуктов (бензинов, авиационных и дизельных топлив) эти фракции необходимо подвергать гидроочистке. Но даже без гидроочистки

на их основе можно производить сольвент (для битумных мастик), печное и маловязкое судовое топливо (СМТ) [3].

Альтернативным методом переработки мазута может быть использование плазмохимического процесса. Как известно, плазмохимические процессы получили в последнее время достаточно широкое распространение в различных отраслях промышленности. Они характеризуются высокой производительностью, возможностью осуществления синтеза новых материалов с заданными свойствами. Плазмохимические процессы применяются в различных малотоннажных и крупнотоннажных производствах: плазменная переработка газообразных, жидких и твердых топлив, углеводородов, гудрона, отходов пластмасс, шин, бытовых отходов [4–35].

Ранее нами было показано, что для неглубокой переработки смеси мазута и бурого каменного угля можно использовать плазмохимический способ [7]. *Цель настоящей работы* – изучение возможностей переработки мазута плазмохимическим методом.

Экспериментальная часть

В качестве сырья для плазмохимической переработки использовали мазут М-100. Физико-химические свойства мазута приведены в табл. 1.

Плазмохимический реактор представляет собой ячейку с двумя электродами. Electrodes помещены в герметичную емкость из диэлектрика.

На электроды подается высокое переменное напряжение 60–65 кВ.

Принципиальная схема плазмохимической установки переработки мазута производительностью 1000 кг/ч приведена в работе [7]. Суммарный расход электроэнергии на плазмохимическую переработку 1000 кг мазута составляет около 30–40 кВт (в том числе на работу плазмохимического реактора 6–8 кВт).

Материальный баланс переработки приведен в табл. 2. Последовательность переработки мазута состояла из следующих стадий:

- прокатка мазута через плазмохимический реактор при 90 °С с получением переработанного продукта;
- разгонка полученного продукта с получением фракции н.к.–360 °С остатка и газа;
- разгонка фракции н.к.–360 °С с получением фракции н.к.–250 °С и остатка – фракции 251–360 °С;
- разгонка фракции 251–360 °С с получением фракции 251–330 °С и остатка – фракции 331–360 °С.

В табл. 3, 4 приведены физико-химические характеристики фракций, которые могут быть использованы как печное топливо и судовое маловязкое топливо. Как следует из табл. 3, основные показатели фракции 251–360 °С соответствуют нормам печного топлива марки А по ТУ 19.20.27-001-05740304–2020.

Как следует из табл. 4, основные показатели фракции 251–330 °С также соответствуют нормам

Таблица 1. Физико-химические характеристики мазута М-100

Наименование показателя	Метод испытания	Норма по ГОСТ 10585–2013. Изм. 1-2	Фактическое значение
Вязкость условная при 100 °С, градусы условные	ГОСТ 6258–85	≤6,8	6,6
Зольность, % (масс.)	ГОСТ 1461–75	≤0,05	0,04
Массовая доля механических примесей, %	ГОСТ 6370–83	≤1,00	0,03
Массовая доля воды, %	ГОСТ 2477–2014	≤1,0	0,2
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	ГОСТ 6307–75	Отс.	Отс.
Массовая доля серы, %	ГОСТ 32139–2019	≤3,0	2,5
Содержание сероводорода, ppm	ГОСТ 32505–2013	≤10,0	8,1
Температура вспышки в открытом тигле, °С	ГОСТ 4333–2014	≥110	112
Температура застывания, °С	ГОСТ 20286–91	≤25	17
Плотность при 15 °С, кг/м ³	ISO 12185–1996	Не нормируется	979,5
Теплота сгорания (низшая) в пересчете на сухое топливо (небраковочная), кДж/кг	ГОСТ 21261–91	≥39900	42380
Выход фракции, выкипающей до 350 °С, % (об.)	ГОСТ 93333–2015	≤17,0	15,4

Т а б л и ц а 2. Материальный баланс плазмохимической переработки нефтяного мазута, в пересчете на 1000 кг, кг

Приход	Расход 1		Расход 2 (после разгонки)		Расход 3 (после второй разгонки)		Расход 4 (после третьей разгонки)		Суммарный расход	Доля, %
	Газ	50	Газ	15 (+50)	Газ	2 (+65)	Газ	3 (+67)		
Мазут 1000	Полупродукт	950	Оттон до 360 °С	455	Фракция н.к.-250 °С	112	Фракция н.к.-250 °С	112	112	11,2
Всего 1000	1000	1000	Всего	1000	Фракция 251-360 °С	341	Фракция 331-360 °С	36	36	3,6
Всего 1000	1000	1000	Всего	1000	1000	1000	1000	1000	1000	100

Т а б л и ц а 3. Физико-химические свойства печного топлива

Наименование показателя	Исходный мазут	Норма по ТУ 19.20.27-001-05740304-2020			Методы испытаний	Значения показателей
		марка А	марка Б	марка В		
Внешний вид		Жидкость от темно-зеленого до черного цвета	Жидкость от темно-коричневого до черного цвета	Жидкость от темно-коричневого до черного цвета	Визуальный осмотр	Темный, непрозрачный
Кинематическая вязкость при 40 °С, не более, сСт		15	20	50	ГОСТ 33	7,481 при 20 °С
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не более	974,0	860,0	940,0	980,0	ГОСТ 3900	867,5
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С, не выше		+60	+80	+130	ГОСТ 4333	79
Содержание воды, %, не более	0,15	5,00	5,00		ГОСТ 2477	<0,05
Массовая доля механических примесей, %, не более		1,00	1,00		ГОСТ 6370	0,04
Массовая доля серы, %, не более	2,50	3,50	3,50		ГОСТ 3877	1,35
Температура застывания, °С, не выше	+3	-20	-10	0	ГОСТ 3877	-34
Фракционный состав:						
30 % перегоняется при температуре °С, не более		240	260	310		
50 % перегоняется при температуре °С, не более		320	330	340	ГОСТ 2177	70 при 350 °С
60 % перегоняется при температуре °С, не более		360	360	360		
Испытания на медной пластинке					ГОСТ 6321	1а
Зольность, % не более		0,5	0,5	1,5	ГОСТ 1461	0

Таблица 4. Физико-химические свойства судового маловязкого топлива (СМТ)

Наименование параметров	Требования ТУ 38.101567–2014	Исходный мазут	Результаты 15.12.2023
Температура вспышки в закрытом тигле, °С, не ниже	61		75
Массовая доля серы, %, не более:			
вид А	0,1		
вид Б	0,2		
вид I	0,5		
вид II	1,0		
вид III	1,20	2,50	1,16
Содержание меркаптановой серы, мг/кг	0,0250		0,0057
Кинематическая вязкость при 20 °С, мм ² /с, не более	11,400		5,455
Температура застывания, °С, не выше:	-10	+3	Ниже -51
Коксуемость, % (масс.)	0,20		0,03
Массовая доля воды, %	Следы	0,15	0,05
Содержание водорастворимых кислот и щелочей (рН)	Отс.		Отс.
Зольность, % (масс.)	0,010		0,004
Массовая доля механических примесей, %	0,02	Отс.	Отс.
Плотность при 15 °С, кг/м ³ , не более	893		-
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не более	890,0	974,0	857,2
Йодное число, г йода/100 г топлива, не более	20,0		29,7

СМТ по ТУ 38.101567–2014, кроме одного показателя – йодного числа.

Для более полной характеристики полученных продуктов использовали ИК-спектроскопию. ИК-спектры снимали на приборе ФСМ-1201 в тонком слое. Материал кюветы – бромистый калий.

ИК-спектры приведены на рис. 1. Как следует из рис. 1, с повышением температуры выкипания фракций существенно увеличивается содержание ароматических соединений, об этом свидетельствует повышение интенсивности полосы поглощения 1601 см⁻¹ (валентных колебаний двойной связи

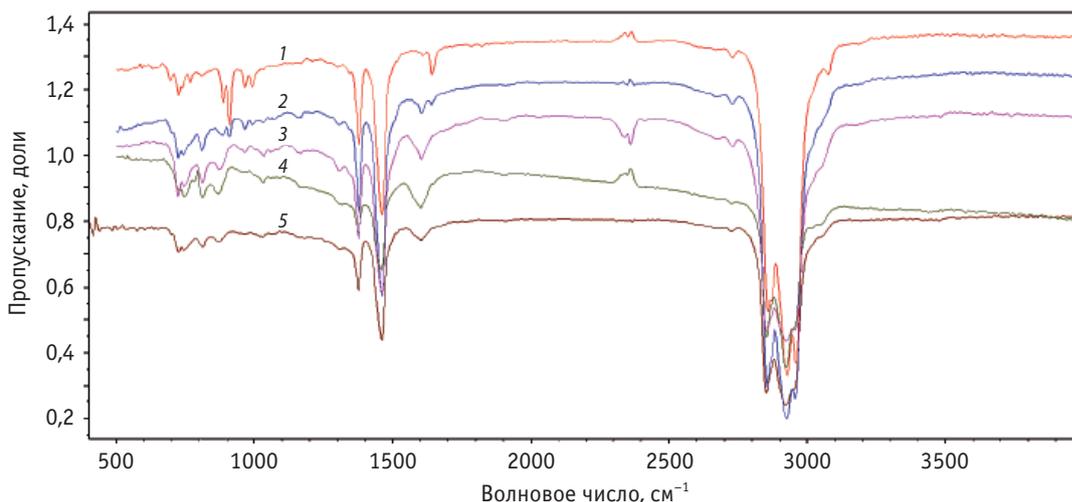


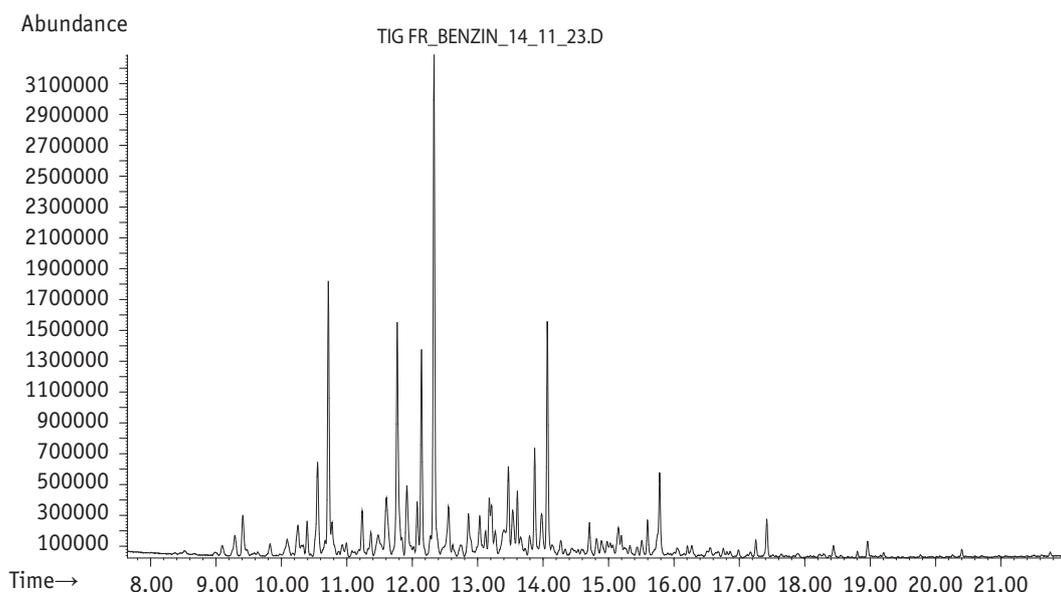
Рис. 1. ИК-спектры продуктов:

1 – сольвент (фр. н.к.–250 °С); 2 – СМТ (фр. 251–330 °С); 3 – Ф5 (фр. 331–360 °С); 4 – остаток-компонент дорожного битума (фр. >360 °С); 5 – мазут М-100

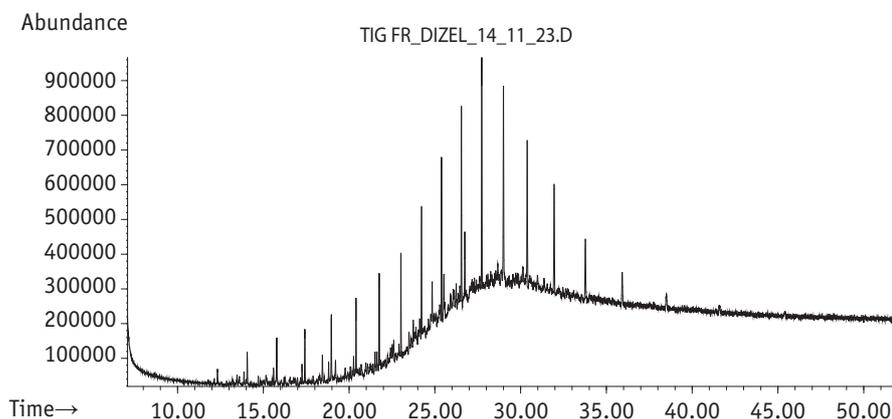
ароматических колец C=C). Необходимо отметить, что в ИК-спектре фракции н.к.–250 °С имеется полоса средней интенсивности 1638 см⁻¹, отвечающая валентным колебаниям двойной связи α-олефинов и полоса 1601 см⁻¹ очень малой интенсивности ароматических соединений. В ИК-спектре фракции 251–330 °С существенно возросла полоса 1601 см⁻¹ и уменьшилась полоса 1638 см⁻¹ по сравнению с ИК-спектром фракции н.к.–250 °С. Этот факт свидетельствует о снижении содержания олефинов и повышении концентрации ароматических соединений с ростом температуры выкипания фракций.

Для определения детального химического состава дистиллятов использовали хромато-масс-

спектрометрию. Пробы дистиллятов анализировали на приборе Agilent 6850/5973. Обработку хроматограмм производили при помощи программ ChemStation и AMDIS. При записи хроматограммы по полному ионному току площадь пика коррелирует с концентрацией компонента. Для соединений одной природы, исходя из практики исследований, площадь пика примерно соответствует концентрации компонентов с относительной погрешностью ~20 %. Для однозначного подтверждения присутствия каждого компонента помимо масс-спектра использовали литературные данные по индексу удерживания. Уровень обработки хроматограммы до 0,1 %. Ка-



Р и с. 2. Хроматография по полному ионному току сольвента (н.к.–250 °С)
(колонка неполярная DB-Petro 100 м × 0,25 мм × 0,5 мкм, газ-носитель – гелий, нагрев 50–290 °С со скоростью 10 °С/мин, затем изотерма при 290 °С)

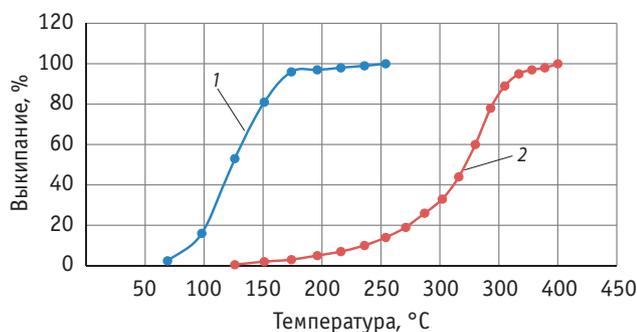


Р и с. 3. Хроматография по полному ионному току СМТ (251–330 °С)
(колонка неполярная DB-Petro 100 м × 0,25 мм × 0,5 мкм, газ-носитель – гелий, нагрев 50–290 °С со скоростью 10 °С/мин, затем изотерма при 290 °С)

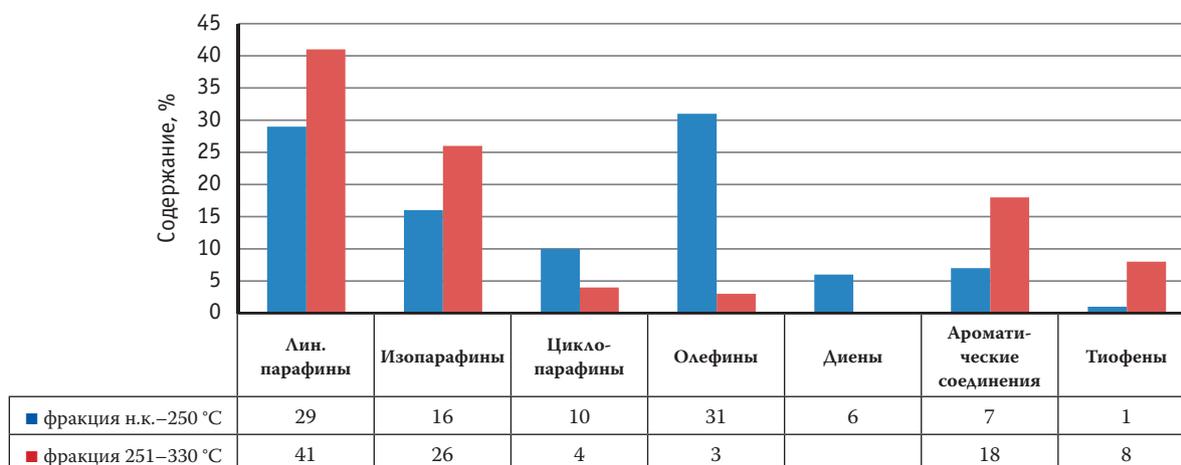
чественный анализ фракций проводили по методу, описанному ранее [32–34]. Индексы удерживания использовали из базы данных [11].

На рис. 2 и 3 приведены хроматограммы по полному ионному току фракций, отобранных до 330 °С. На основе хроматографических данных построены имитационные интервалы выкипания фракций, которые приведены на рис. 4. Как следует из рис. 4, интервал выкипания фракций значительно шире по сравнению с температурным интервалом, зафиксированным при перегонке. Так, фракция н.к.–250 °С была отобрана в интервале 190–250 °С по хроматографическим данным от 70 до 250 °С, основной объем фракции выкипает от 100 до 200 °С. Фракция, отобранная в интервале 251–330 °С, по хроматографическим данным, содержит соединения, выкипающие от 120 до 400 °С, основной объем этой фракции выкипает от 200 до 350 °С.

Существенные отклонения в определении интервалов выкипания обусловлены образованием множества азеотропных смесей в процессе простой дистилляции, в состав высококипящей части обязательно входят легкокипящие компоненты, а



Р и с. 4. Фракционный состав:
1 – фракция н.к.–250 °С; 2 – фракция 251–330 °С



Р и с. 5. Групповой состав фракций

в состав низкокипящей части входят высококипящие соединения.

На рис. 5 приведен групповой состав фракций, определенный методом хромато-масс-спектрометрии.

Обсуждение результатов

В литературе описано много вариантов плазмохимических реакторов. Условно их можно разделить на реакторы, работающие в газовой и конденсированной фазе [13–21]. В каждом методе есть свои особенности в зависимости от цели использования плазмохимического метода, конструкции реактора, исходного сырья и получаемых продуктов. Важно отметить, что при переработке углеводородного сырья образуется сажа, содержащая фуллерены и нанотрубки [13, 14]. Необходимо отметить, что высокомолекулярные линейные парафины термически разлагаются при высоких температурах (от 500 до 600 °С) и повышенном давлении, с образованием низкомолекулярных парафинов, олефинов, ароматических соединений, но заметного количества кокса не образуют [35]. Нами установлено, что при плазмохимической обработке линейных парафинов образуется небольшое количество сажи. Заметного количества фуллеренов в ней не найдено. То есть в продукте реакции присутствовали исходный парафин и сажа, других соединений не обнаружено.

В процессе плазмохимической обработки между электродами проскакивают многочисленные точечные разряды, которые вызывают локальный высокотемпературный нагрев продуктов, проходящих через зазор. Разряды вызывают локальное образование свободных радикалов и ионов, которые приводят к крекингу в основном алкилнафте-

нов и алкилароматических высокомолекулярных соединений.

Как следует из рис. 5, фракция н.к.–250 °С содержит около 30 % олефинов и 6 % диенов. Именно эти соединения могут полимеризоваться и повышать вязкость продукта плазмохимической переработки мазута до разгонки. Во фракции 251–330 °С отсутствуют диены и содержится около 3 % олефинов. При этом в этой фракции около 40 % линейных парафинов и 26 % ароматических соединений. Соединения серы представлены в основном производными бенз- и дибензтиофена.

Содержание серы распределяется следующим образом, %: 0,57 – сольвент (фракция н.к.–250 °С); 1,16 – СМТ (фракция 251–330 °С); 2,1 – Ф5 (фракция 331–360 °С); 2,5 – исходный мазут М100; 2,6 – остаток разгонки плазмохимически обработанного мазута М100.

Во фракции н.к.–250 °С содержатся в основном метил и диметилдибензтиофены, во фракции 251–330 °С ди- и триметилдибензтиофены. В пересчете по содержанию серы получается примерно тиофенов: 3 % содержит фракция н.к.–250 °С и 7 % – фракция 251–330 °С. Это приблизительно соответствует данным рис. 5.

В отходящих газах качественно определены: водород, оксид и диоксид углерода, сероводород, смесь предельных и непредельных углеводородов C₁–C₄, в том числе диенов.

Образовавшийся остаток с пенетрацией 150 дмм и температурой размягчения по кольцу и шару (КиШ) 73 °С можно использовать как компонент дорожного битума и сырья замедленного коксования.

Заключение

Показано, что при переработке мазута на установке производительностью 1000 кг/ч плазмохимическим методом получается, %: 6,7 – газа; 48,0 – остатка; 11,2 – сольвента и 34,1 – печного топлива. Из печного топлива может быть получено, %: 0,3 – газа; 30,2 – СМТ и 3,6 – мазута Ф-5.

Как при плазмохимической переработке, так и при вакуумной разгонке мазута получается около 45 % дистиллятных фракций, которые имеют интервалы выкипания н.к.–360 °С и 360–500 °С соответственно. Получаемые плазмохимическим методом жидкие фракции могут быть гидроочищены и переработаны совместно с фракциями замедленного коксования и висбрекинга.

Таким образом, плазмохимический метод при низких энергетических затратах (6–8 кВт/т) может быть использован как нетрадиционный способ переработки нефтяного мазута.

Список источников

1. Халикова Д. А., Петров С. М., Баширцева Н. Ю. Обзор перспективных технологий переработки тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов // Вестн. Казанского технологич. ун-та. 2014. Т. 16 (3). С. 217–221.
2. Галиуллин Э. А., Фахрутдинов Р. З. Новые технологии переработки тяжелых нефтей и природных битумов // Вестн. Казанского технологич. ун-та. 2016. Т. 19 (4). С. 47–51.
3. Нефтегазовый комплекс: Современное состояние, проблемы и перспективы развития / под ред. проф. А. Ф. Андреева. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2020. 445 с.
4. Чёботова В. И., Уланов В. В. Глубина переработки нефти в России // Деловой журнал Neftgaz.RU. 2021. № 1. С. 14–18.
5. Глаголева О. Ф., Капустин В. М. Повышение эффективности процессов подготовки и переработки нефти // Нефтехимия. 2020. Т. 60, № 6. С. 745–754.
6. Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V., Naumov I. A., Ratnikov M. A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources // J. of Mining Institute. 2022. № 2. P. 1–17 <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>.
7. Аврамов Д. В., Родионов М. М., Васильев В. В., Саламатова Е. В. Совместная переработка нефтяного мазута и бурого угля плазмохимическим методом // Кокс и химия. 2023. № 11. С. 24–29.
8. Kameshkov A. V., Rudko V. A., Gabdulkhakov R. R. et al. Pyragay Technology of Producing Petroleum Coking Additives to Replace Coking Coal // ACS Omega. 2021. Vol. 6, № 51. P. 35307–35314. DOI: 10.1021/acsomega.1c04075
9. Rudko V. A., Derkunsii I. O., Gabdulkhakov R. R., Konoplin R. R., Pyagay I. N. Kinetics of various hydrocarbon groups formation in distillates obtained during the production of needle coke via the delayed coking of decantoil // Egypt. J. Pet. 2022. Vol. 31, № 1. P. 33–38. DOI: 10.1016/j.ejpe.2022.02.002
10. Efimov I. I., Smyshlyaeva K. I., Povarov V. G. UNIFAC residual marine fuels stability prediction from NMR and elemental analysis of SARA components // Fuel. 2023. Vol. 352. P. 129014. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129014.
11. Kondrasheva N. K., Rudko V. A., Kondrashev D. O. et al. Effect of Delayed Coking Pressure on the Yield and Quality of Middle and Heavy Distillates Used as Components of Environmentally Friendly Marine Fuels // Energy and Fuels. 2019. Vol. 33, № 1. P. 636–644. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b03756
12. ChemSpider-Search and share chemistry // <http://www.chemspider.com>
13. Пат. 2511384 РФ. МПК C01B 31/02. Способ получения сажи, содержащей фуллерены и нанотрубки, и устройство для его осуществления / Тахаутдинов Р. Ш., Галеев И. Г., Тимеркаев Б. А., Гисматуллин Н. К., Зиганшин Д. И., Мухамедзянов Р. Б.; – № 2012151069/05; Заявл. 28.11.2012; опубл. 20.10.2014.
14. Пат. 2531291 РФ. МПК C01B 31/02. Способ получения сажи, содержащей фуллерены и нанотрубки из газообразного углеводородного сырья / Тахаутдинов Р. Ш., Галеев И. Г., Тимеркаев Б. А., Гисматуллин Н. К.,

Зиганшин Д. И., Мухамедзянов Р. Б.; – № 2012151069/05; заявл. 28.11.2012; опублик. 20.10.2014.

15. Мессерле В. Е., Устищенко А. Б. Плазменная переработка газообразных и твердых топлив // Современная наука исследования, идеи, результаты, технологии. 2015. № 1 (16). С. 200–206.

16. Шарина И. А., Перепечко Л. Н., Анышаков А. С. Перспективы использования плазменной технологии для переработки/уничтожения техногенных отходов // ЭКО. 2016. № 12. С. 28–35.

17. Гарифзянова Г. Г., Гарифзянов Г. Г. Пиролиз гудрона плазмохимическим методом // Химия и технология топлив и масел. 2006. № 3. С. 15–17.

18. Словецкий Д. И. Разложение углеводородов в тлеющем разряде // Химия плазмы. 1981. № 8. С. 189–230.

19. Пархоменко В. Д., Цибулев П. Н., Краснокутский Ю. И. Технология плазмохимических производств. Киев : Выща школа, 1991. 253 с.

20. Жуков М. Ф., Калинин Р. А., Левицкий А. А., Полак Л. С. Плазмохимическая переработка угля. М. : Наука, 1990. 200 с.

21. Низкотемпературная плазма. Т. 3. Химия плазмы / под ред. Л. С. Полака, Ю. А. Лебедева. Новосибирск : Наука, 1991. 328 с.

22. Бельченко И. Н., Петрусенко А. П., Песин О. Ю. Исследование состава жидких продуктов, образующихся при электрокрекинге органического сырья. Хим. пром. 1992 г., №7, стр. 14–15

23. Залялетдинов Ф. Д. Разложение тяжелых углеводородов на лёгкие фракции с использованием электродуговой плазмы. Дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05, КНИТУ КАИ. Казань, 2011.

24. Николаев А. И., Пешнев Б. В., Трофимова Н. Н. Влияние степени разложения сырья на выход и характеристики продуктов электрокрекинга // Вестн. МИТХТ. 2012. Т. 7, № 6. С. 60–64.

25. Бельченко И. Н., Петрусенко А. П., Песин О. Ю. Исследование состава жидких продуктов, образующихся при электрокрекинге органического сырья // Хим. пром. 1992. № 7. С. 14–15.

26. Сурис А. А. Плазмохимические процессы и аппараты. М. : Химия, 1998. 304 с.

27. Лебедев Ю. А., Карпенко Е. И., Мессерле В. Е. Введение в плазмохимию использования топлив. Улан-Уде : Изд-во ВСГТУ, 2000. 219 с.

28. Nazarenko M. Y., Saltykova S. N. Obtaining semi-coke from oil shale of the Leningrad deposit // *Chernye Metally*. 2022. № 10. P. 4–8. DOI: 10.17580/chm.2022.10.01

29. Smyshlyaeva K. I., Rudko V. A., Kuzmin K. A., Povorov V. G. Asphaltene genesis influence on the low-sulfur residual marine fuel sedimentation stability // *Fuel*. 2022. Vol. 328. P. 125291. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125291>

30. Nazarenko M. Y., Saltykova S. N., Rudko V. A., Pihl O. Production of Isotropic Coke from Shale Tar at Various Parameters of the Delayed Coking Process // *ACS Omega*. 2021. № 6. P. 22173–22179. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02842>

31. Рудко В. А., Габдулханов Р. Р., Пягай И. Н. Научно-техническое обоснование возможности организации производства игольчатого кокса в России // *Записки горного института*. 2023. Т. 263, № 5. С. 795–809.

32. Васильев В. В. Антикоррозионные и гидроизоляционные материалы на основе нетрадиционного сырья – сланцевых смол и окисленных нефтяных битумов. СПб. : СПбГИЭУ, 2007. 235 с.

33. Лаврова А. С., Васильев В. В., Страхов В. М. Сравнительный анализ продуктов коксования гудрона западносибирской нефти и тяжелого газойля каталитического крекинга // *Кокс и химия*. 2019. № 4. С. 42–47.

34. Петрович Н. И., Остроухов Н. Н., Васильев В. В., Саламатова Е. В., Страхов В. М. Сопоставительный анализ химического состава легких мазутных фракций, полученных при полукоксовании сланца кукуерсита в газогенераторе и установке с твердым теплоносителем // *Кокс и химия*. 2019. № 6. С. 34–42.

35. Sugimoto Y., Horie Y., Saotome Y., Tserendor T., Byambajav E. Thermal Cracking of Paraffinic and Middle East Atmospheric Residues and Hydrotreatment of Distillate Products // *J. of the Japan Petroleum Institute*. 2013. Vol. 56 (1). P. 44–51.

Статья поступила в редакцию 23.03.2024;
одобрена после рецензирования 20.04.2024;
принята к публикации 10.05.2024