

ОБЕССЕРИВАНИЕ НЕФТИ, ДИЗЕЛЬНЫХ И МАСЛЯНЫХ ФРАКЦИЙ ОБРАБОТКОЙ ОЗОНОМ И ХЛОРИДАМИ МЕТАЛЛОВ

© 2023 г. И. Р. Нигматуллин^{1,*}, В. И. Зубер², Р. Г. Нигматуллин³

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Башкортостан, Уфа, 450062 Россия

² АО Газпромнефть-МНПЗ, Москва, 109429 Россия

³ Уфимский университет науки и технологий, Башкортостан, Уфа, 450008, Россия

*E-mail: nigmatullin@himmotolog.ru

Поступила в редакцию 9 июня 2021 г.

После доработки 3 марта 2023 г.

Принята к публикации 25 апреля 2023 г.

Проведено обессеривание Западно-Сибирской нефти Самотлорского месторождения, дизельных фракций и индустриального масла И-20А хлоридами металлов $ZnCl_2$, $FeCl_3$, $AlCl_3$ и комплексным реагентом (композицией), состоящим из 70 мас. % $AlCl_3$, 25 мас. % окисленного дизельного топлива и 5 мас. % $NaOH$. Показано, что: после очистки смеси дизельных фракций реагентами $AlCl_3 + NaOH$ при соотношении 10 : 1 (по массе) содержание серы в очищенной смеси уменьшилось с 0.82 до 0.146%; после очистки композицией (соотношение 1:1 по массе) масла И-20А содержание серы в нем уменьшилось с 0.2 до 0.03 мас. %. После очистки Западно-Сибирской нефти, в которой сераорганические соединения предварительно были окислены озono-кислородной смесью до сульфоксидов и сульфонов, действие композиции (соотношении 20:1) привело к уменьшению содержания серы с 1.8 до 0.5 мас. %. Отработанная композиция утилизирована введением в битум.

Ключевые слова: нефть, обессеривание, окисленное дизельное топливо, озон, регенерация, хлориды металлов, композиция, деасфальтизат, рафинат, сераорганические соединения, сульфоксиды, сульфоны, утилизация

DOI: 10.31857/S0028242123030048, **EDN:** JVBKCF

Серосодержащие соединения в нефти отрицательно влияют на процессы ее переработки: отравляют катализаторы, вызывают коррозию оборудования и трубопроводов [1, 2], загрязняют окружающую среду, ухудшают эксплуатационные свойства нефтепродуктов, такие как стабильность и восприимчивость к присадкам у автомобильных бензинов, активность антидетонаторов, антиокислительная стабильность топлива, и увеличивают их склонность к нагаро- и смолообразованию [3].

Дистилляты, получаемые в процессах переработки нефти, отличаются количеством и составом сернистых соединений [4, 5] и соответственно, методами и условиями их очистки.

На сегодняшний день в промышленности самым распространенным методом, связанным с раз-

рушением сераорганических соединений и удалением их из топлив, является процесс гидроочистки нефти и нефтяных фракций [6–8].

В промышленности применяют также метод очистки от серосодержащих соединений путем их окисления с одновременной очисткой нефтяных фракций экстракцией растворителями, в качестве которых можно использовать фенол, фурфурол, диэтиленгликоль, жидкий сернистый ангидрид, сульфолан, фтористый водород [9]. В работах [10, 11] в качестве экстрагентов использовали метанол, ацетонитрил, ДМФА и ДМСО. Окисление сераорганических соединений проводят пероксидами и гидропероксидами металлов в присутствии катализаторов, в качестве которых могут выступать соединения переходных металлов [12, 13]. Анализ

современного состояния данной отрасли показал, что комбинацией различных методов можно уменьшить содержание серы в нефтепродуктах до 0.0005 мас. % [14].

Данный способ позволяет обеспечивать высокую селективность и скорость процесса окисления с выделением сульфоксидов. Сульфоксиды и сульфоновы, полученные окислением сераорганических соединений нефти, могут быть затем выделены и использованы для получения антиокислительных и противокоррозионных присадок [15, 16], флотореагентов и пластификаторов [17–19].

В работе исследована технология очистки и обессеривания нефти и ее фракций апротонными кислотами Льюиса. Выбор реагентов на основе кислот Льюиса для обессеривания нефти, дизельных и масляных фракций обусловлен их применением в качестве селективных катализаторов таких процессов химической промышленности, как полимеризация, алкилирование ароматических углеводородов (УВ) [20, 21].

Так, катализаторы на основе $AlCl_3$ в разные годы использовались для очистки авиационного масла [22] и нефтепродуктов от азотистых, смолисто-асфальтовых [23] и гетероатомных соединений путем комплексообразования последних с $TiCl_4$ с последующим отделением рафината [24]. Катализаторы на основе $AlCl_3$ были использованы также в процессах парового крекинга [25], алкилирования и изомеризации [26]. Из работ [20, 27] известно, что галогениды металлов способны растворяться в органических растворителях за счет эффекта координации; при этом катализаторные комплексы, приготовленные с использованием органических растворителей, эффективнее самих галогенидов металлов. Исходя из этого, авторами работы были проведены исследования и разработана композиция для очистки нефти и нефтепродуктов, состоящая из хлористого алюминия, гидроксида натрия и окисленного дизельного топлива.

Цель работы – очистка нефти и нефтяных фракций с удалением сераорганических соединений разработанными композициями на основе хлоридов металлов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объекты исследования. Для получения композиций использовали: дизельное топливо (ДТ ООО

«Газпром нефтехим Салават»); гидроксид натрия (основного вещества 98.5%, АО «БСК»); хлористый цинк (безводный, 98%, Weifang Longhong Chemical, Китай); хлорное железо (безводное, 95%, Weifang Longhong Chemical, Китай); хлористый алюминий (безводный, 99,6%, Acros Organics BVBA, Бельгия).

Для регенерации отработанной композиции использовали смесь растворителей: нефрас-80/120 (БР-1 «Галоша», легкокипящая фракция деароматизированного бензина, по ГОСТ 443-76, ПАО НК «Роснефть») и толуол (по ГОСТ 14710-78, АО «ЭКОС-1»).

Хлористый алюминий в полиэтиленовом мешке (во избежание гидролиза на воздухе) перетирали в ступке пестиком до фракции не крупнее 1 мм и просеивали через сито. Гидроксид натрия прокаливали в течение 20 мин.

Толуол и растворитель нефрас 80/120, используемые для регенерации отработанной композиции, перегоняли для удаления высококипящих фракций.

Дизельное топливо (ДТ) при температуре 24–27°C обрабатывали озono-кислородной смесью из озонатора Крозон 2001. Озono-кислородную смесь, содержащую 1.0 г/л озона, подавали в реактор, где барботировали через слой ДТ. Высота реактора составляла 300 мм, внутренний диаметр – 50 мм. Озон подавали через фильтр, создающий поток мелких пузырьков и увеличивающий контакт газовой фазы с жидкой, чем способствовал их интенсивному барботажу через слой жидкости. Конверсию озона не контролировали.

Элементный анализ частиц металлов в масле выполняли на оптико-эмиссионном анализаторе износа OSA4 Metallab фирмы SpectroScientific.

Содержание серы определяли на флуоресцентном спектрометре АСЭ-2 фирмы «Буревестник».

Микрохимический анализ и структуру комплексного реагента определяли с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6490 LV с приставкой EDAX.

Для приготовления композиции использовали лопастную мешалку (скорость вращения 150–200 об/мин); температура синтеза комплекса 85–90°C. Приготовление композиций осуществляли в течение 9 ч в термостатированной трехгорлой колбе с механической мешалкой на глицериновой бане

Таблица 1. Показатели качества исследуемой Западно-Сибирской нефти Самотлорского месторождения

Наименование показателей	Значение
Плотность при температуре 20°C, кг/м ³	853.6
Вязкость кинематическая при температуре 50°C, мм ² /с	6.34
Показатель преломления при температуре 50°C	1.4824
Содержание серы, мас. %	1.8
Содержание тяжелых металлов в нефти, мг/кг	
Fe	2.75
Zn	1.23
V	22.5
Ni	12.8
Al	отс.

Таблица 2. Паспорт качества минерального масла И-20А

Наименование показателей	Значение
Вязкость кинематическая при 40°C, мм ² /с	29.28
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла	0.0062
Зольность, %	0.0044
Массовая доля серы в маслах из сернистых нефтей, %	0.2
Содержание механических примесей	отсутствие
Содержание воды, %	следы
Плотность при 20°C, кг/м ³	890
Цвет на колориметре ЦНТ, единицы ЦНТ	2.0
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °C	201
Содержание растворителей в маслах селективной очистки, %	отсутствие
Температура застывания, °C	–15

при постоянном перемешивании до получения однородной, не расслаивающейся массы.

Показатели качества исследуемой нефти Западной Сибири Самотлорского месторождения и индустриального масла И-20А (паспорт качества) приведены в табл. 1, 2.

В качестве сырья для очистки комплексообразующими соединениями использовали: вакуумную и прямогонную дизельные фракции; смесь дизельных фракций производства ООО «Газпром Нефтехим Салават».

Методика очистки. Обработку исходной нефти композицией проводили в круглодонной колбе на водяной бане при температуре 45°C и постоянном перемешивании в течение 45 мин. Верхний слой (деасфальтизат) сливали из колбы и анализировали. На дне колбы вместе с композицией оставались

асфальтены и смолы. В экстракторе композицию отделяли от асфальтенов и смол, экстрагируя их смесью растворителей нефрас 80/120–толуол, в соотношении 1:1 (по об.) при температуре 80–90°C; далее отгоняли растворитель и подвергали асфальтены и смолы (асфальт) анализу.

Процесс очистки дизельных фракций от сераорганических соединений и полициклических ароматических УВ хлоридами металлов (ZnCl₂, FeCl₃, AlCl₃) и композицией (AlCl₃ + NaOH) осуществляли при температуре 45°C в круглодонной колбе (термостат) с мешалкой. Сначала сераорганические соединения нефтяных фракций окисляли озono-кислородной смесью на лабораторной установке при температуре 45°C в течение 120 мин. Содержание серы в очищенных продуктах определяли на рентгенфлуоресцентном анализаторе для

Таблица 3. Результаты очистки дизельных фракций от сераорганических соединений

Исходные дизельные фракции	Содержание сераорганических соединений, $C_{\text{ср}}$, %	Комплексообразующие соединения				
		3% ZnCl_2	3% FeCl_3	3% AlCl_3	3% $\text{AlCl}_3 + \text{NaOH}$	10% $\text{AlCl}_3 + \text{NaOH}$
Вакуумная дизельная фракция	1.6445	1.0443	1.3319	0.3943	0.3845	0.2074
Прямогонная дизельная фракция	1.1047	0.6375	0.8573	0.7483	0.7247	0.3608
Смесь дизельных фракций	0.8281	0.4752	0.6341	0.3011	0.2865	0.1463

измерения массовой доли серы в топливе, нефти и нефтепродуктах (см. выше).

Очистку от оксидатов нефтяных фракций с помощью композиции осуществляли в термостатированном реакторе с мешалкой при температурах 45–85°C (в зависимости от вязкости сырья). Время перемешивания композиции с сырьем 15–20 мин, отстой 20–25 мин. При этом композиция вступает в реакцию комплексообразования с сераорганическими, ароматическими и непредельными УВ и выпадает в осадок. Верхнюю фазу – очищенную нефтяную фракцию – отделяли от композиции декантацией.

Регенерацию отработанной композиции проводили растворителем, состоящим из смеси нефрас 80/120:толуол в соотношении 1:1 (по об.), при температурах очистки оксидатов нефтяных фракций в реакторе с мешалкой. Отношение количества смешанного растворителя к отработанной композиции составляло 1.5:1 (по об.), время перемешивания 15 мин. После декантации смешанный растворитель отгоняли из колбы с насадкой и холодильником.

Полученные очищенные нефтяные фракции и концентраты сераорганических соединений, экстрагированные смешанным растворителем из отработанной композиции, анализировали на содержание серы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из работ [9, 28, 29] известно, что хлориды металлов вступают во взаимодействие с сераорганическими соединениями, а также полицикличе-

скими ароматическими и непредельными УВ; при низких температурах они инертны к нафтоновым и парафиновым УВ. Реакция протекает по донорно-акцепторному механизму, в котором сераорганические соединения выступают в качестве лиганда (донора электронов).

С целью разработки лучшей композиции для удаления сераорганических, непредельных и полициклических ароматических соединений была проведена обработка дизельных фракций нефти хлоридами различных металлов – ZnCl_2 , AlCl_3 (жесткие кислоты Льюиса) и FeCl_3 , занимающего промежуточное положение среди жестких и мягких кислот [30], а также смесью $\text{AlCl}_3 + \text{NaOH}$. Результаты очистки представлены в табл. 3.

Выход вакуумной дизельной фракции после очистки $\text{AlCl}_3 + \text{NaOH}$ (10 мас. %) составил 76.4%, отработанных комплексообразующих соединений – 23.6%. При уменьшении количества комплексообразующих соединений до 3% выход очищенной вакуумной дизельной фракции увеличивается до 89.2%, однако при этом содержание серы увеличивается до 0.3845%. Количество отработанного комплексообразующего соединения составило 10.8%.

Исследование показало, что при очистке дизельных фракций AlCl_3 (3 мас. %) и $\text{AlCl}_3 + \text{NaOH}$ (3 мас. %) показатели содержания серы близки по значениям; при этом результаты очистки дизельных фракций от серы при помощи AlCl_3 (3 мас. %) лучше, чем с участием ZnCl_2 и FeCl_3 (при той же концентрации соли 3 мас. %). Показано также, что хлористый цинк и хлорное железо при использо-

Таблица 4. Характеристики продуктов разделения после очистки

Наименование показателей качества	Нефть+2% П (об.)		Нефть+5% П (об.)		Обезвоженная нефть+ 5% П (об.)		Деасф.+10% (мас.) глины
	деасфальтизат	асфальт	деасфальтизат	асфальт	деасфальтизат	асфальт	бессмоленный деасфальтизат
Выход, мас. %	91.53	8.24	67.8	32.0	75.7	23.5	93
Показатель преломления при 50°C	1.4818	1.5010	1.4717	1.4980	1.4690		1.4682
Кинематическая вязкость, мм ² /с							
при 50°C	5.48	–	4.26	–	3.59	–	3.48
при 100°C	3.91	7.32	3.045	7.7	2.53	96.36	1.63
Плотность при 20°C, кг/м ³	850.1	913.6	864.2	903.7	804.4	962.1	755.3
Содержание серы, мас. %	1.2	7.2	0.7	12.7	0.5	13.8	0.47

вании в качестве очистных реагентов в количестве (3 мас. %) плохо отделяются от очищенной дизельной фракции; при этом выходы самой очищенной вакуумной дизельной фракции составили 83.4% и 79.6% соответственно.

Для приготовления композиции из исследованных реагентов использовали $AlCl_3$, а также готовили три композиции: I – 60% $AlCl_3$, 25% окисленного ДТ, 15% NaOH; II – 70% $AlCl_3$, 25% окисленного ДТ, 5% NaOH; III – 80% $AlCl_3$, 15% окисленного ДТ, 5% NaOH (по массе). Готовность композиции определяли по полной растворимости хлористого алюминия и гидроксида натрия в окисленном ДТ.

При интенсивном перемешивании реагентов с окисленным ДТ проходят реакции окисления ароматических УВ в смолы и образования комплексов с хлористым алюминием [9, 28]. В результате синтеза композиция представляет собой гомогенное комплексное соединение, в котором молекулы $AlCl_3$, вероятнее всего, образуют либо координационные связи с неподеленными электронными парами серосодержащих соединений в составе окисленного дизельного топлива (сульфоксиды или не

окислившиеся сульфиды), либо с электронами ароматических или непредельных УВ. Состав и строение композиции требует дополнительных экспериментальных исследований.

Из табл. 4 видно, что качественные характеристики деасфальтизата при действии композиции существенно лучше, чем у исходного сырья – понижаются показатель преломления, плотность и вязкость, улучшается цвет очищенной нефти.

На рис. 1 показана зависимость количества серы в очищенном масле И-20А от содержания хлористого алюминия в составе композиции, из которой видно, что с увеличением содержания $AlCl_3$ в композиции содержание серы в очищенном масле снижается.

Нами было проанализировано содержание металлов в нефти до и после очистки на примере композиции II; результаты представлены в табл. 5. Из нее видно, что в деасфальтизате значительно снижается содержание Fe, Zn, V и Ni. Важным преимуществом качества деасфальтизата перед неочищенной нефтью является низкое содержание в нем металлов, отравляющих катализаторы гидрогени-

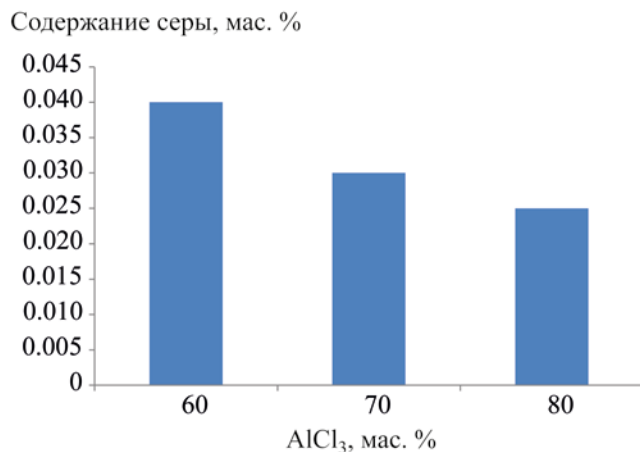


Рис. 1. Зависимость содержания серы в очищенном масле И-20А от содержания хлористого алюминия в составе композиции.

зационных процессов на нефтеперерабатывающих заводах.

С целью многократного использования отработанную композицию регенерировали различными растворителями: нефрас 80/120°C; толуол; смесь нефраса 80/120°C с толуолом (соотношении 50:50 по об.) в количестве 1:1 и 1:1.5 (об.) к отработанной композиции. Результаты исследования эффективности растворителей для регенерации отработанной композиции приведены в табл.6

В ходе экспериментов использовали одну и ту же композицию (до 11 раз), регенерируя ее смесью растворителей нефрас:толуол 1:1.5 (по об.) после каждой очистки масла И-20А. Показано, что при регенерации отработанной композиции толуолом при соотношении 1:1.5 (по об.), после 5-ой очистки активность композиции резко падает. Из табл. 6 видно, что для регенерации отработанной композиции предпочтительно использовать смесь растворителей нефрас 80–120°C–толуол при соотношении 1 : 1.5 (по об.).

В ходе регенерации отработанной композиции смесью растворителей выделяли рафинатный раствор, из которого отгоняли растворитель, получая рафинат-2, представляющий собой концентрат сульфоксидов и сульфонов. Показатели качества рафината-2 приведены в табл. 7.

У рафината-2 определяли трибологические характеристики на четырехшариковой машине трения ЧМТ-1. Результаты испытания представлены в табл.8.

Результаты испытания на ЧМТ-1 свидетельствуют о том, что сульфоксиды и сульфоны, содержащиеся в оксидате рафината-2, придают ему высокотемпературные и противоизносные свойства [31], диаметр пятна износа уменьшился с 0.6 мм до 0.52 мм, а нагрузка сваривания при температуре 150°C увеличилась с 1980 до 2460 Н по сравнению с рафинатом-2.

Таблица 5. Показатели содержания металлов в нефти до и после очистки композицией II

Содержание металлов в нефти, мг/кг	До очистки	После очистки
Fe	2.75	0.91
Zn	1.23	0.58
V	22.5	15.4
Ni	12.8	10.4
Al	отсутствие	отсутствие

Таблица 6. Эффективность растворителей для регенерации отработанной композиции

Растворитель	Выход рафината, мас. % из отработанной композиции (обработка растворителями 1:1 по об.)	Выход рафината, мас. % из отработанной композиции (обработка растворителями 1:1.5 по об.)
Нефрас 80–120°C	36	48
Толуол	41	52
Нефрас 80–120°C:толуол (50:50)	43	54

Таблица 7. Показатели качества рафината-2

Показатели качества рафината-2	Значения
Вязкость кинематическая при 40°C, сСт	82
Содержание серы, мас. %	10.4
Плотность, г/см ³	0.92
Температуры кипения, °C	500–540

В соответствии с работами [32–34] нами было проведено исследование состава отработанной композиции с целью последующей ее утилизации. Результаты химического анализа композиции после термообработки при 420°C и данные ПЭМ (просвечивающей электронной микроскопии) частиц композиции, содержащих химические элементы, приведены в табл. 9 и на рис. 2.

На основе результатов исследования отработанной композиции разработан способ ее утилизации введением в гудрон. Так, после добавления 3 мас. % отработанной композиции в гудрон Западно-Сибирской нефти перед окислением, получен битум БНД-90/130, соответствующий требованиям по ГОСТ 22245 (ГОСТ 22245-90 Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия); при этом в 1.2 раза сократилось время окисления гудрона [18].

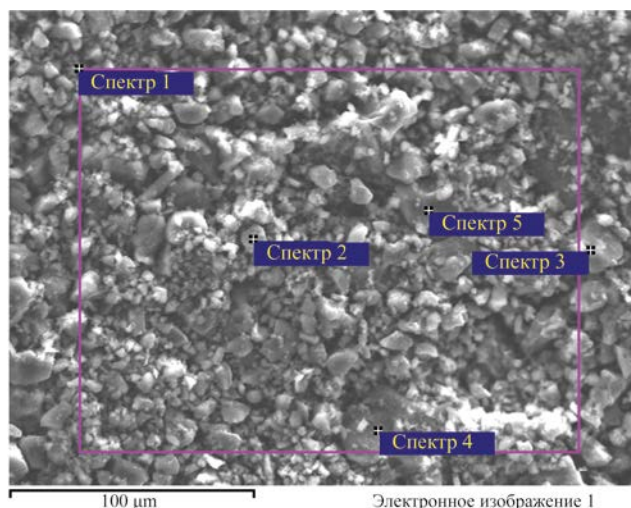


Рис. 2. ПЭМ частиц композиции, содержащей химические элементы – алюминий, натрий, углерод, кислород и хлор.

ВЫВОДЫ

1. При обессеривании смеси дизельных фракций Западно-Сибирской нефти Самотлорского месторождения реагентами композиции $AlCl_3 + NaOH$ при соотношении 10:1 (по массе), содержание сераорганических соединений в очищенной смеси дизельных фракций уменьшается с 0.82 до 0.146%.

Таблица 8. Трибологические характеристики рафината-2 и оксидата рафината-2

Показатели качества	Рафинат-2	Оксидат Рафината-2
Индекс задира, Н	320	458
Показатель износа ($D_{из}$, диаметр пятна износа) при осевой нагрузке 392 Н, при температуре 100°C, мм	0.6	0.52
Нагрузка сваривания при температуре 150°C, Н	1980	2460

Таблица 9. Результат химического анализа композиции после термообработки при температуре 420°C^а

Спектр, мкм	C	O	Al	Na	Cl	Итог
Спектр 1	64.2	4.8	14.0	0.8	16.2	100.00
Спектр 2	46.35	2.83		50.82		100.00
Спектр 3	72.65	0.17	11.41	1.97	13.80	100.00
Спектр 4	62.67	2.0	8.52	23.86	2.95	100.00
Спектр 5	65.44	1.32	9.44	21.43	2.37	100.00
Макс.	72.65	4.8	14.0	50.82	16.2	
Мин.	46.35	0.17	8.52	0.8	2.37	

^а Спектры получены на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6490 LV.

При очистке масла И-20А композицией при соотношении 1:1 (по массе) содержание сераорганических соединений в нем уменьшается с 0.2 до 0.03%. Очистка самой нефти композицией на основе $AlCl_3 + NaOH$ (соотношение 20:1 по массе) также снижает содержание сераорганических соединений в ней с 1.8 до 0.5% (по массе).

2. После очистки окисленной Западно-Сибирской нефти композицией на основе $AlCl_3 + NaOH$, содержание металлов в деасфальтизате падает: Fe – с 2.75 до 0.91 мг/кг; Zn – с 1.23 до 0.58 мг/кг; V – с 22.5 до 15.4 мг/кг; Ni – с 12,8 до 10.4 мг/кг.

3. В ходе исследований подобран эффективный смешанный растворитель нефрас 80/120–толуол для регенерации отработанной композиции.

4. После регенерации отработанной композиции смешанным растворителем, из рафинатного раствора получен рафинат-2 с пределами кипения 500–540°C. Рафинат-2 после окисления содержащихся в нем сераорганических соединений озонно-кислородной смесью обладает высокими смазывающими свойствами.

5. Отработанная композиция утилизируется введением в гудрон для получения дорожного битума БНД-90/130.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нигматуллин Ильшат Ришатович, к.т.н., доц., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7893-5557>

Зубер Виталий Игоревич, аспирант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8105-303X>

Нигматуллин Ришат Гаязович, д.т.н., проф., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6350-1775>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кундик А.А. Обеспечение надежности трубопроводных систем. Метод диагностики внутреннего антикоррозионного покрытия трубопроводов // Нефть. Профессионально о нефти. 2017. Вып. 1. С. 74–76.
2. Рудякова Е.В. Система оценки качества топлива, масел и специальных жидкостей. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. техн. университета, 2013. 56 с.
3. Шишлов А.Н., Лебедев С.В. Автомобильные эксплуатационные материалы. Учебно-практическое пособие для автомобильных колледжей. М.: ГБПОУ КАТ, 2018. № 9. 209 с.
4. Харлампики Х.Э. Сераорганические соединения нефти, методы очистки и модификации // Соросовский образовательный журнал. 2000. № 7. С. 42–46.
5. Наметкин С.С. Химия нефти. М.: АН СССР, 1955. 799 с.
6. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа. Уфа: Гилем, 2002. 669 с.
7. Каминский Э.Ф., Хавкин В.А. Глубокая переработка нефти: технологические и экологические аспекты. М.: Техника, 2001. 384 с.
8. Kilanowski D.R., Teeuwen H., Beer V.H.J., Gates B.C., Schuit G.C.A., Kwart H. Hydrodesulfurization of thiophene, benzothiophene, dibenzothiophene, and related compounds catalyzed by sulfided $CoO-MoO_3/\gamma-Al_2O_3$: low-pressure activity studies // J. of Catalysis. 1978. V. 55. № 2. P. 129–137.
9. Файзулдинов А.А., Шейкина М.А. Методы очистки высокосернистой нефти от серосодержащих примесей // Научные известия. 2022. № 27. С. 170–172.
10. Сафаров Б.Ж., Шамсиева М.Б. Извлечение нефтяных сульфидов и сульфоксидов из высокосернистых дизельных дистиллятов экстракционным методом // Молодой ученый. 2014. № 9 (68). С. 200–204.
11. Ali M.F., Al-Malki A., El-Ali B., Martinie G., Siddiqui M. Deep desulphurization of gasoline and diesel fuels using non-hydrogen consuming techniques // Fuel. 2006. V. 85. P. 1354–1363.
12. Шарипов А.Х., Нигматуллин И.Р., Нигматуллин В.Р., Мухаметова Р.Р. Окисление сульфидов масляных фракций пероксидом водорода в присутствии карбонильных соединений // Нефтехимия. 2008. Т. 48. № 6. С. 462–466 [Sharipov A.Kh., Nigmatullin I.R., Nigmatullin V.R., Mukhametova R.R. Oxidation of lube-stock sulfides by hydrogen peroxide in the presence of carbonyl compounds // Petrol. Chemistry. 2008. V. 48. № 6. P. 466–470. <https://doi.org/10.1134/S096554410806011X>].
13. Asghar M., Mohammad A.S., Mohammad A.N. Oxidative desulfurization of non-hydrotreated kerosene using hydrogen peroxide and acetic acid // Chinese J. of Chem. Engineering. 2009. V. 17. № 5. P. 869–874.
14. Хавкин В.А., Каминский Э.Ф., Гуляева Л.А., Елишин А.И., Зеленцов Ю.Н., Кастерин В.Н., Киселёв В.Н., Крашук С.Г., Левина Л.А., Мусеев В.М., Сидоров И.Е., Томин В.П. Способ получения моторных топлив // Патент РФ № 2232183 от 10.07.2004. Заявлено 26.11.2002. Б.И. № 19. 2004.
15. Шарипов А.Х. Получение сераорганических соединений из природного углеводородного сырья (обзор) //

- Нефтехимия. 2004. Т. 44. № 1. С. 3–10 [Sharipov A.Kh. Production of organic sulfur compounds from natural hydrocarbon feedstock (review) // Petrol. Chemistry. 2004. V. 44. № 1. P. 1–7].
16. *Большаков Г.Ф.* Сераорганические соединения нефти. Новосибирск: Наука, 1986. 256 с.
17. *Сангалов Ю.А., Дмитриев Ю.К., Маталинов В.И., Лакеев С.Н., Майданова И.О., Карчевский С.Г.* Элементная сера: от сырья к новым веществам и материалам // Вестник Башкирского университета. 2004. № 2. С. 3134.
18. *Фомин А.Ю., Хозин В.Г.* Применение серы в производстве дорожно-строительных материалов // Строительные материалы. 2009. № 11. С. 20–22.
19. *Гринберг А.А.* Введение в химию комплексных соединений. Л.: Химия, 1964. 608 с.
20. *Балакирев Е.С., Гершеневич А.И., Сулейманова Г.Е.* Способ получения катализатора на основе хлористого алюминия для алкилирования ароматических углеводородов олефинами и галоидными алкилами // Авторское свидетельство СССР № 136717. Заявлено 15.07.60. Б.И. № 6. 1961.
21. *Шутько А.П., Минералов О.И., Бабин Е.П., Есипов Г.В., Новиков И.Н., Халиуллин В.Х., Зуев В.П., Сахапов Г.В., Ликумович А.Г.* Способ разложения каталитического комплекса на основе хлористого алюминия для алкилирования бензола // Авторское свидетельство СССР № 992083 СССР. Заявлено 07.12.81. Б.И. № 4. 30.01.83.
22. *Векслер М.Я., Семенова А.А.* Очистка нефтепродуктов. Труды ЦИАТИМ. М.-Л. Гостоптехиздат, 1947. Вып. 3. С. 87–96.
23. *Сафонов Г.А., Овсянников Л.Ф., Плюснин А.Н., Кряжев Ю.Г., Оречкин Д.Б., Зеленцов Ю.Н., Бембель В.М.* Способ очистки нефтепродуктов от азотистых и смолисто-асфальтовых соединений // Патент СССР № 597709. Заявлено 16.07.75. Б.И. № 10. 1978.
24. *Бейко О.А., Большаков Г.Ф., Карпицкий В.И., Майкова Т.В., Сагаченко Т.А., Цой Л.А.* Способ очистки нефти и нефтепродуктов от гетероатомных соединений путем комплексообразования // Авторское свидетельство СССР № 1089105. Заявлено 15.07.82. Б.И. № 16 от 30.04.1984.
25. *Leamen W.G.* Treating oils // Patent US № 1769791. 1930. С.А. 24, 4625.
26. *Еситаки Х., Танимото К., Котепа Н.* Способ получения алюминиево-галоидного комплекса // Патент СССР № 953985. Заявлено 25.05.73. Оpubл. 23.08.82. Б.И. № 31.
27. *Зубер В.И.* Совершенствование и разработка технологий переработки нефти, нефтяных продуктов и переработки тяжелых нефтяных фракций с использованием комплексных соединений // Дисс.... канд. техн.наук. Уфимский гос. нефтяной технический университет. Уфа, 2023. 102с.
28. *Максимов А.Л., Нехаев А.И.* Комплексообразование тиофеновых соединений с переходными металлами – ключ к пониманию механизмов обессеривания нефтепродуктов // Нефтехимия. 2020. Т. 60. № 2. С. 172–182. <https://doi.org/10.31857/S0028242120020070> [Maksimov A.L., Nekhaev A.I. Complexation of thiophene compounds with transition metals as the key to understanding the mechanisms of desulfurization of petroleum products // Petrol. Chemistry. 2020. V. 60. № 2. P. 155–165. <https://doi.org/10.1134/S0965544120020073>].
29. *Томас Ч.* Безводный хлористый алюминий. – М., Издательство иностранной литературы, 1949. 1000 с.
30. *Кукушкин Ю.Н.* Кислоты и основания в координационной химии // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 1. С. 28–32.
31. *Нигматуллин В.Р., Абрамов А.Н., Пузырьков Д.Ф.* Композиция смазки для редукторов и способ ее получения (С10М 169/00) // Патент РФ № 2502791. Заявлено 23.08.2013.
32. *Бабин Е.П., Шутько А.Т., Лозовой В.И., Лобанов Ю.П.* Способ регенерации каталитического комплекса на основе хлористого алюминия для алкилирования бензола // Авторское свидетельство СССР № 722567. Кл. В01 J31/40, 1976. Заявлено 07.06.76.
33. *Галиев Р.Ф., Нигматуллин В.Р.* Получение дизельного топлива с низким содержанием серы и аренов // Нефтепереработка и нефтехимия. 2015. № 1. С. 11–12.
34. *Зубер В.И., Нигматуллин Р.Г., Нигматуллин В.Р., Нигматуллин И.Р.* Способ очистки вторичного бензина от сернистых соединений и непредельных углеводородов жидким катализаторным комплексом // Патент РФ № 2595899. Заявлено 20.11.2016.