

УДК 665.65

DOI: 10.15372/KhUR2022398

EDN: XLIYXX

Исследование процесса совместной переработки прямогонной дизельной фракции и подсолнечного масла на цеолитном катализаторе типа ZSM-5

Д. В. СОСНИНА, Н. Е. БЕЛОЗЕРЦЕВА, А. А. АЛТЫНОВ, И. А. БОГДАНОВ, М. В. КИРГИНА

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск (Россия)

E-mail: dvs66@tpu.ru

(Поступила 03.09.21; после доработки 02.12.21)

Аннотация

Разработка процессов совместной переработки растительных масел и углеводородов, целью которых служит получение низкозастывающих и экологически чистых компонентов дизельных топлив, является актуальным направлением развития топливно-энергетической отрасли. Большую популярность в качестве катализаторов в последнее время приобретают цеолиты различного строения и модификаций. Выполнена переработка на цеолитном катализаторе типа ZSM-5 прямогонного дизельного топлива и смеси дизельного топлива с добавлением 10 об. % подсолнечного масла при давлении 0.35 МПа, скорости подачи сырья 0.5 ч⁻¹ и двух различных температурах проведения процесса – 375 и 475 °С. Выявлены закономерности влияния температуры переработки и вовлечения подсолнечного масла в переработку на цеолитном катализаторе на состав и свойства полученных продуктов. Показано, что закономерности зависят от температуры реализации процесса. Установлено, что продукты совместной переработки подсолнечного масла и дизельного топлива на цеолитном катализаторе по низкотемпературным свойствам соответствуют: полученные при 375 °С – арктической марке товарного дизельного топлива, при 475 °С – зимней марке товарного дизельного топлива. Показано, что полученные продукты переработки на цеолитном катализаторе являются перспективными компонентами низкозастывающих топлив. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности совместной переработки подсолнечного масла и дизельной фракции на цеолитном катализаторе для создания низкозастывающих компонентов моторных топлив. Вовлечение подсолнечного масла позволит расширить сырьевой пул для производства топлив.

Ключевые слова: биоконпоненты топлив, цеолитный катализатор, низкозастывающее дизельное топливо, растительное масло, совместная переработка

ВВЕДЕНИЕ

Развитие экономики влечет за собой увеличение объемов потребления моторных топлив и, как следствие, истощение природных ресурсов, повышение цен на углеводородное сырье и загрязнение окружающей среды. В связи с этим проблема поиска альтернативных, возобновляемых источников энергии, способных заменить традиционные, – актуальная задача развития

топливно-энергетического комплекса. Кроме того, при поиске альтернативных источников топлива стоит учитывать, что холодные климатические условия и географическое положение большей части Российской Федерации обуславливают необходимость исследований, направленных на получение именно низкозастывающих топлив.

На сегодняшний день одним из наиболее распространенных альтернативных топлив являет-

ся биодизельное топливо, получаемое перестерификацией растительных масел [1]. Однако биодизельные топлива, синтезированные с использованием различного сырья, существенно различаются по свойствам, что влечет за собой возможные потери качества при смене сырьевого ресурса. Также стоит отметить, что биодизельные топлива обладают низкотемпературными характеристиками (предельная температура фильтруемости и температура застывания) [2–5], которые не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к дизельным топливам (ДТ) зимней и арктической марок [6].

Одним из перспективных направлений для получения низкозастывающих биокомпонентов моторных топлив является каталитический крекинг растительных масел. Данный процесс позволяет существенно расширить сырьевую базу для производства компонентов моторных топлив. Одно из главных преимуществ крекинга растительных масел – отсутствие в данном виде сырья азот- и серосодержащих соединений, что позволяет снизить выбросы вредных веществ в атмосферу.

В работе [7] было исследовано получение моторного топлива из масла яatroфы путем каталитического крекинга. Процесс осуществлялся в реакторе периодического действия в атмосфере азота при температуре 375 °С. В качестве катализаторов крекинга были использованы цеолит типа ZSM-5 с соотношением Si/Al, равным 35, смесь цеолита типа ZSM-5 и алюмосиликата в соотношении 1 : 1 (соотношение Si/Al в используемом алюмосиликате равно 45), а также алюмосиликат, пропитанный солями никеля и молибдена (нитрат никеля и молибдат аммония). Наибольшую эффективность показал катализатор из смеси цеолита и алюмосиликата, поскольку при его использовании для переработки масла яatroфы полученные продукты крекинга содержат 36 % углеводородов бензинового ряда (C_7-C_{11}) и 58 % углеводородов дизельного ряда ($C_{12}-C_{22}$).

Авторами [8] было изучено превращение отработанных масел в биотопливо в ходе крекинга в псевдоожигенном слое. Переработка осуществлялась на лабораторной установке каталитического крекинга в интервале температур 450–520 °С. Результаты исследования показали, что выходы ДТ, бензина и сжиженного нефтяного газа находятся в интервале 25–29, 40–42 и 14–18 мас. % соответственно. Также было установлено, что с повышением температуры процесса каталитического крекинга воз-

растает конверсия ДТ в бензин и сжиженный нефтяной газ.

В работе [9] было исследовано влияние температуры и времени протекания процесса на характеристики биотоплива, полученного каталитическим крекингом отработанного масла. Каталитический крекинг проводился на комбинированном катализаторе H-USY и ZSM-5 в соотношении 0.5 : 0.5. Температура процесса варьировалась в пределах 400–550 °С с шагом 50 °С, а время процесса – от 30 до 60 мин с шагом 15 мин. Процесс проводился в проточном реакторе при атмосферном давлении. В ходе исследования было установлено, что наибольшая эффективность катализатора наблюдается при температуре крекинга 450 °С и времени протекания процесса, равном 60 мин. При данных условиях выход биотоплива составил 49.35 мас. %.

Анализ работ [7–9] показал, что переработка растительных масел хотя и является перспективной, но не позволяет получать компоненты моторных топлив с большим выходом. Кроме того, получаемые продукты обладают неудовлетворительными низкотемпературными характеристиками, что ограничивает их использование.

В настоящее время для получения низкозастывающих ДТ активно применяется процесс каталитической депарафинизации, который основан на удалении парафиновых углеводородов из нефтепродуктов избирательным гидрокрекингом на металл-цеолитных катализаторах. Однако процесс каталитической депарафинизации не позволяет повысить экологичность топлива, т. е. снизить содержание вредных веществ в продуктах сжигания. Также данный процесс сложен при реализации из-за требующегося в больших количествах водородсодержащего газа и чувствительности катализатора к различным контактным ядам [10]. Повысить экологичность топлива возможно путем переработки нефтепродуктов с добавлением растительного масла в качестве смесового компонента.

Таким образом, исследования, посвященные совместной переработке растительных масел и углеводородов, целью которых является получение ДТ, удовлетворяющих требованиям стандартов, с возможностью вовлечения экологически чистых компонентов, становятся наиболее актуальными в настоящее время.

В работе [9] исследовано совместное превращение вакуумного газойля и растительного масла в условиях каталитического крекинга. Результаты исследования показали, что добавление от 3 до 10 мас. % подсолнечного масла

позволяет повысить выход бензиновой фракции и достичь максимальной конверсии исходного смесового сырья. При дальнейшем увеличении количества вовлекаемого масла наблюдается закоксовывание катализатора и его дезактивация.

Авторами [11] описан способ получения низкозастывающих моторных топлив путем гидрогенизационной переработки сырья, состоящего из смеси дистиллятов растительного и нефтяного происхождения. Содержание дистиллята растительного происхождения в смеси варьировалось от 5.0 до 40.0 мас. %. Следует отметить, что переработку сырья осуществляли в две стадии. Первая стадия – гидрооблагораживание сырья, вторая – депарафинизация и гидроочистка на цеолитсодержащем алюмомолибденовом катализаторе. Было установлено, что возможно осуществлять вовлечение до 40 мас. % растительного дистиллята в сырье для каталитической переработки. При этом наблюдаются снижения температуры застывания топлива (до $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$), предельной температуры фильтруемости (ниже $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$), содержания серы (менее 0.01 мас. %), а также высокий выход целевых продуктов процесса (96 мас. %).

Большую популярность в качестве катализаторов в последнее время приобретают цеолиты различных строений и модификаций. Совершенствование цеолитных катализаторов, которые активно применяются в процессах крекинга и гидрокрекинга – одно из наиболее важных направлений развития катализа.

Цеолитные катализаторы используют для проведения реакций органического и неорганического синтеза, так как они термически стабильны и устойчивы по отношению к контактными ядам. Цеолиты типа Y и ZSM-5 широко применяются в качестве активных компонентов катализаторов в процессах крекинга, глубокого крекинга тяжелого сырья, гидродепарафинизации, гидрокрекинга [12, 13].

Особенности строения высококремнеземных цеолитов обуславливают их избирательную адсорбцию к углеводородам, обеспечивая при этом доступ, как правило, к парафиновым углеводородам нормального и слаборазветвленного строения [14]. Кристаллическая структура позволяет значительно понизить крекирующую активность катализаторов на основе данных цеолитов, уменьшить их закоксовывание при переработке сырья широкого фракционного состава, в том числе и для тяжелых углеводородов, для которых внутренний объем цеолитных каналов практически недоступен.

Анализ литературных данных позволяет сделать вывод, что совместная переработка растительных масел и прямогонных ДТ на цеолитном катализаторе может стать решением существующих проблем, связанных с экологией и истощением нефтяных ресурсов, позволяя при этом получать низкозастывающие углеводородные компоненты моторных топлив.

Таким образом, цель данной работы – оценка целесообразности совместной переработки прямогонной дизельной фракции и подсолнечного масла на цеолитном катализаторе типа ZSM-5 для получения низкозастывающих смесовых компонентов товарных дизельных топлив.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Объектом исследования служили подсолнечное масло (ПМ), прямогонное ДТ (сДТ, где с – сырье), смесь прямогонного ДТ и 10 об. % подсолнечного масла (сДТПМ), а также продукты их переработки на цеолитном катализаторе (пДТ и пДТПМ – продукты переработки сДТ и сДТПМ соответственно).

В качестве катализатора был использован цеолитный катализатор структурного типа ZSM-5 марки КН-30, предоставленный ПАО “Новосибирский завод химконцентратов”. Порошок цеолита содержит 90.0–97.6 мас. % SiO_2 , 1.4–2.7 мас. % Al_2O_3 , не более 0.1 мас. % Na_2O и 0.35–1.00 мас. % Fe_2O_3 . Характеристики катализатора (по данным, предоставленным заводом-изготовителем): насыпная плотность – 0.60–0.86 г/см³, силикатный модуль в исходной форме цеолита – 50–90 моль/моль, удельная поверхность – не менее 300 м² [15].

Методики исследования

Процесс переработки на цеолитном катализаторе был осуществлен на лабораторной каталитической установке САТАСОН (Россия). Для реализации процесса в реактор загружалось 10 см³ предварительно измельченного цеолитного катализатора (фракция 0.5–1.0 мм²). Процесу переработки предшествовала активация катализатора – прокалка в течение 8 ч при температуре 500 °C в токе азота.

Каталитическая переработка проводилась при давлении 0.35 МПа, скорости подачи сырья 0.5 ч⁻¹ и двух различных температурах проведения процесса – 375 °C (температура 1) и 475 °C (температура 2).

Поскольку при переработке на цеолитном катализаторе происходит значительное облегчение фракционного состава продуктов, для стабилизации из продуктов была отогнана легкая фракция с температурой кипения (т. к.) до 150 °С. Стабилизация позволяет рассматривать полученные продукты как дизельную фракцию и оценивать на соответствие требованиям [6].

Методы исследования

Состав и свойства образцов исследовали следующими методами:

- вязкость определяли с использованием вискозиметра Stanbinger SVM3000 (Anton Paar, Австрия) в соответствии с методикой, представленной в [16]. Пределы допускаемой относительной погрешности измерений ± 0.35 %;
- плотность определяли при помощи вискозиметра Stanbinger SVM3000 в соответствии с методикой [17]. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений ± 0.5 кг/м³;
- содержание серы определяли с использованием рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализатора “СПЕКТРОСКАН S” (НПО “СПЕКТРОН”, Россия) в соответствии с методикой, представленной в [18]. Пределы допускаемой относительной погрешности измерений ± 0.5 %;
- температуру помутнения (T_n) определяли с помощью термостата жидкостного низкотемпературного КРИО-Т-05-01 (ООО “ТЕРМЭКС”, Россия) согласно методике, представленной в [19]. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений ± 1.0 °С;

– предельную температуру фильтруемости (ПТФ) определяли с использованием термостата жидкостного низкотемпературного КРИО-Т-05-01 и установки определения ПТФ ДТ на холодном фильтре согласно методике, представленной в [20]. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений ± 1.0 °С;

– температуру застывания (T_z) определяли с использованием термостата жидкостного низкотемпературного КРИО-Т-05-01 согласно методике, представленной в [21]. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений ± 1.0 °С;

– фракционный состав определяли согласно методике, представленной в [22]. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений ± 1.0 °С;

– групповой углеводородный состав определяли анилиновым методом согласно методике, представленной в [23];

– цетановый индекс (ЦИ) рассчитывали в соответствии с методикой, представленной в [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние вовлечения подсолнечного масла в переработку на цеолитном катализаторе на состав и свойства полученных продуктов

Для определения целесообразности вовлечения ПМ в переработку на цеолитном катализаторе были определены состав и свойства сырья и продуктов процесса. Результаты представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Видно, что свойства полученных продуктов зависят от температуры реализации процесса (см. табл. 1).

Проведение переработки на цеолитном катализаторе при 375 °С (температура 1) с добавлением 10 об. % ПМ к ДТ приводит к небольшому снижению плотности и вязкости продуктов, увеличению ЦИ, снижению содержания серы; при этом фракционный состав продукта и ПТФ практически не изменяются.

Добавка 10 об. % ПМ к ДТ при реализации переработки на цеолитном катализаторе при 475 °С (температура 2) приводит к облегчению фракционного состава продуктов (более значительному, чем при 375 °С), небольшому повышению плотности и вязкости продуктов, повышению содержания серы, снижению ЦИ; ПТФ продукта при этом практически не изменяется.

Из результатов, представленных на рис. 1, можно видеть, что по сравнению с пДТ полученные при 375 °С пДТПМ характеризуются увеличением содержания ароматических и пара-

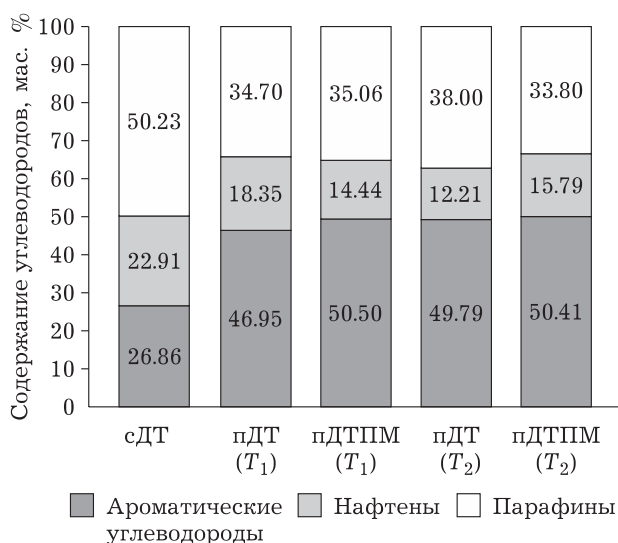


Рис. 1. Групповой состав сырья и продуктов переработки на цеолитном катализаторе при различных температурах проведения процесса ($T_1 = 375$ °С, $T_2 = 475$ °С).

ТАБЛИЦА 1

Характеристика сырья и продуктов переработки на цеолитном катализаторе при различных температурах проведения процесса

Характеристика	Сырье		Продукт			
	сДТ	сДТПМ	375 °С		475 °С	
			пДТ	пДТПМ	пДТ	пДТПМ
Вязкость при 20 °С, мм ² /с	3.96	5.20	4.29	4.21	3.99	4.07
Плотность при 15 °С, кг/м ³	837.3	845.8	874.8	870.9	876.0	877.7
Массовая доля серы, мг/кг	5781	4654	6260	5667	5043	5168
ЦИ, пункты	48.9	45.3	36.3	37.4	36.6	35.1
T _п , °С	-4	-6	ниже -72	ниже -72	ниже -72	ниже -72
ПТФ, °С	-5	-10	-47	-46	-45	-43
T _з , °С	-14	-11	ниже -72	ниже -72	ниже -72	ниже -72
Фракционный состав, °С:						
н. к.	145	131	150	150	150	150
Отгон 10 об. %	190	189	168	169	167	166
Отгон 50 об. %	273	273	264	265	266	257
Отгон 90 об. %	286	286	345	344	356	346

Примечание. ЦИ – цетановый индекс; T_п, T_з – температуры помутнения и застывания соответственно; ПТФ – предельная температура фильтруемости; н. к. – температура начала кипения; ПМ – подсолнечное масло; сДТ – дизельное топливо (сырье), сДТПМ – смесь дизельного топлива с подсолнечным маслом; пДТ и пДТПМ – продукты переработки сДТ и сДТПМ на цеолитном катализаторе соответственно.

финовых углеводородов, но снижением содержания нафтеннов, в то время как полученные при 475 °С пДТПМ – увеличением содержания ароматических и нафтенновых углеводородов, но снижением содержания парафинов.

Полученные результаты объясняются следующим. При переработке сДТПМ при 375 °С происходит частичный крекинг жирных кислот, входящих в состав ПМ, с образованием короткоцепочечных парафинов (рост содержания парафинов в продуктах по сравнению с переработкой чистого ДТ) и олефинов. Короткоцепочечные олефины являются предпочтительными “строительными блоками” для получения ароматических углеводородов перераспределением водорода (рост содержания ароматических углеводородов в продуктах по сравнению с переработкой сДТ). Образование дополнительных легких парафинов и олефинов за счет вовлечения в переработку ПМ объясняет снижение плотности и вязкости продукта. Снижение содержания серы связано с ее отсутствием в составе ПМ, ЦИ повышается в связи со снижением плотности.

При переработке при 475 °С происходит полный крекинг входящих в состав ПМ жирных кислот с образованием длинноцепочечных парафинов, последующий крекинг которых дает длинноцепочечные олефины. Данные олефины являются более предпочтительными “строитель-

ными блоками” для образования нафтеннов (рост содержания нафтеннов в продуктах по сравнению с переработкой сДТ). Образование дополнительных тяжелых нафтеннов за счет вовлечения в переработку ПМ приводит к небольшому росту плотности и вязкости, ЦИ снижается в связи с повышением плотности. Увеличение содержания серы можно объяснить следующим образом: в результате более интенсивного протекания реакций крекинга при температуре процесса 475 °С образуются более летучие продукты, стабилизация которых приводит к концентрированию серы.

При добавлении 10 об. % ПМ к ДТ при переработке на цеолитном катализаторе наблюдается незначительное ухудшение низкотемпературных свойств полученных продуктов.

Влияние температуры переработки смесевое дизельного топлива на цеолитном катализаторе на состав и свойства полученных продуктов

Увеличение температуры переработки сДТПМ на цеолитном катализаторе с 375 до 475 °С практически не влияет на фракционный состав полученных продуктов, но приводит к небольшому увеличению температуры конца кипения продуктов (на 2 °С, см. табл. 1).

При переработке сДТПМ на цеолитном катализаторе наблюдается снижение вязкости и ЦИ,

а также повышение плотности и содержания серы в полученных пДТПМ (см. табл. 1). Кроме того, наблюдается значительное улучшение низкотемпературных свойств продуктов процесса по сравнению с исходным сырьем (снижение ПТФ более чем на 30 °С).

Увеличение температуры переработки сДТПМ на цеолитном катализаторе с 375 до 475 °С приводит к снижению вязкости (на 0.14 мм²/с), увеличению плотности (на 6.8 кг/м³), снижению содержания серы (на 499 мг/кг) и ЦИ (на 2.3 пункта). Также наблюдается незначительное повышение ПТФ (на 3 °С).

Увеличение температуры конца кипения продуктов, а также снижение вязкости при увеличении плотности объясняется образованием с одной стороны более легких углеводородов в результате протекания реакций крекинга, а с другой – тяжелых ароматических углеводородов в результате реакций перераспределения водорода в олефинах.

Так как после проведения переработки была выполнена стабилизация полученных продуктов, это повлекло за собой увеличение их плотности и, соответственно, ЦИ.

Повышение содержания серы в продуктах переработки сДТПМ связано с концентрированием при стабилизации. Однако снижение содержания серы в продуктах с увеличением температуры переработки на цеолитном катализаторе достигается за счет усиления реакций перераспределения водорода в олефинах с образованием не только ароматических углеводородов, но и водорода, и последующего гидрирования серосодержащих соединений.

Значительное улучшение низкотемпературных свойств обусловлено снижением содержания длинноцепочечных парафиновых углеводородов в результате протекания реакций крекинга, а также увеличением содержания разветвленных парафинов, образующихся в реакциях изомеризации. Известно, что изопарафины характеризуются оптимальными низкотемпературными свойствами по сравнению с парафинами нормального строения. Небольшой рост ПТФ с повышением температуры процесса переработки с 375 до 475 °С связано с утяжелением продуктов и увеличением содержания нафтенов.

Анализируя изменение группового состава в результате переработки на цеолитном катализаторе (см. рис. 1), следует отметить увеличение содержания ароматических углеводородов практически в 2 раза, а также снижение со-

держания парафинов и нафтенов примерно в 1.5 раза. При повышении температуры переработки на цеолитном катализаторе можно видеть, что содержание ароматических углеводородов практически не изменилось (снизилось на 0.09 мас. %), содержание нафтенов выросло (на 1.35 мас. %), а парафинов снизилось (на 1.26 мас. %).

Наблюдаемое изменение состава пДТПМ находит объяснение в механизме химических превращений, протекающих на цеолитных катализаторах: основными реакциями являются реакции крекинга парафиновых и нафтенных углеводородов (снижение содержания) с образованием олефинов и последующим перераспределением водорода в олефинах с образованием ароматических углеводородов (увеличение содержания).

Рост содержания нафтенных при повышении температуры процесса переработки объясняется тем, что при более высокой температуре (475 °С) происходит крекинг жирных кислот, входящих в состав ПМ, с образованием длинноцепочечных парафинов, последующий крекинг которых дает длинноцепочечные олефины. Данные олефины являются более предпочтительными “строительными блоками” для образования нафтенных, а не ароматических углеводородов.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о целесообразности совместной переработки ПМ и ДТ на цеолитном катализаторе типа ZSM-5 для получения низкозастывающих компонентов моторных топлив. Полученные продукты следует рассматривать в качестве смесевых компонентов товарных топлив: недостаточно высокий ЦИ может быть компенсирован смешением с компонентами, имеющими запас по данной характеристике; проведение процесса гидроочистки позволит снизить высокое содержание серы. Вместе с тем, вовлечение ПМ в переработку позволит расширить сырьевой пул для производства топлив.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На лабораторной каталитической установке осуществлена переработка на цеолитном катализаторе сДТ и сДТПМ при давлении 0.35 МПа, скорости подачи сырья 0.5 ч⁻¹ и двух различных температурах – 375 и 475 °С. Показано, что в результате переработки сДТПМ на цеолитном катализаторе происходит снижение тем-

пературы начала кипения и одновременное увеличение температуры конца кипения продуктов; снижение вязкости и ЦИ; повышение плотности и содержания серы; значительное снижение ПТФ (на 33–36 °С); увеличение содержания ароматических углеводородов, а также снижение содержания парафинов и нафтен в продуктах.

Выявлены закономерности влияния температуры переработки на цеолитном катализаторе сДТПМ на состав и свойства полученных продуктов. Показано, что увеличение температуры переработки сДТПМ на цеолитном катализаторе с 375 до 475 °С приводит к небольшому увеличению температуры конца кипения продуктов; снижению вязкости, содержания серы и ЦИ; увеличению плотности и ПТФ (на 3 °С); незначительному снижению содержания ароматических углеводородов; росту содержания нафтен и снижению содержания парафинов.

Выявлены закономерности влияния добавления ПМ в переработку на цеолитном катализаторе на состав и свойства полученных продуктов и показано, что они зависят от температуры реализации процесса. При проведении переработки на цеолитном катализаторе при 375 °С добавление 10 об. % ПМ к ДТ приводит к незначительному росту ПТФ продуктов (на 1 °С), повышению содержания в продуктах ароматических углеводородов, но снижению содержания нафтен. При реализации переработки на цеолитном катализаторе при 475 °С добавление 10 об. % ПМ к ДТ приводит к незначительному росту ПТФ продуктов (на 2 °С), повышению содержания в продуктах ароматических углеводородов и нафтен, но снижению содержания парафинов.

Установлено, что продукты совместной переработки ПМ и ДТ (пДТПМ) на цеолитном катализаторе по низкотемпературным свойствам соответствуют: полученные при 375 °С – арктической марке товарного ДТ, при 475 °С – зимней марке товарного ДТ. Показано, что эти продукты переработки являются перспективными смешанными компонентами низкокзастывающих топлив.

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности совместной переработки ПМ и ДТ на цеолитном катализаторе типа ZSM-5 для получения низкокзастывающих смешанных компонентов моторных топлив. Вовлечение ПМ позволит расширить сырьевой пул для производства топлив.

Авторы выражают благодарность ПАО “Новосибирский завод химконцентратов” за предоставле-

ние цеолитного катализатора для проведения исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Белозерцева Н. Е., Богданов И. А., Бальжанова А. Т., Торчакова О. М., Соснина Д. В., Белинская Н. С., Киргина М. В. Использование биодизеля в качестве смешанного компонента товарных дизельных топлив // *Химия уст. разв.* 2020. Т. 28, № 2. С. 131–140.
- 2 Болоев П. А., Бураев М. К., Шистеев А. В., Бодякина Т. В. К вопросу об использовании биотоплива в дизельных двигателях // *Вестник ВСГУТУ.* 2018. № 3 (70). С. 31–36.
- 3 Марков В. А., Девянин С. Н., Нагорнов С. А., Акимов В. С. Биодизельные топлива из различных сырьевых ресурсов // *Транспорт на альтернативном топливе.* 2011. № 3. С. 25–31.
- 4 Vashist D., Ahmad M. Statistical analysis of diesel engine performance for castor and jatropha biodiesel-blended fuel // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering.* 2014. Vol. 10. P. 2155–2169.
- 5 Sharma V., Duraisamy G. Production and characterization of bio-mix fuel produced from a ternary and quaternary mixture of raw oil feedstock // *J. Cleaner Prod.* 2019. Vol. 221. P. 271–285.
- 6 ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
- 7 Biswas S., Sharma D. K. Effect of different catalyst on the cracking of jatropha oil // *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 2014. Vol. 110. P. 346–352.
- 8 Le-Phuc N., Tran T. V., Phan T. T., Ngo P. T., Ha Q. L. M., Luong T. N., Tran T. H., Phan T. T. High-efficient production of biofuels using spent fluid catalytic cracking (FCC) catalysts and high acid value waste cooking oils // *Renewable Energy.* 2021. Vol. 168. P. 57–63.
- 9 Доронин В. П., Потапенко О. В., Липин П. В., Сорокина Т. П. Превращения растительных масел в условиях каталитического крекинга // *Катализ в промышленности.* 2013. № 6. С. 61–67.
- 10 Belinskaya N., Frantsina E., Lutsenko A., Belozertseva N., Ivanchina E. Studying the process of diesel fuel catalytic dewaxing using the unsteady mathematical model // *Pet. Sci. Technol.* 2020. Vol. 38, No. 20. P. 936–944.
- 11 Пат. RU 2737724 C1, 2020.
- 12 Ci Q., Zhou Y., Wei Q., Tao X., Yu G., Wang Y., Yang J. Role of the zeolite crystallite size on hydrocracking of vacuum gas oil over NiW/Y-ASA catalysts // *Energy Fuels.* 2012. Vol. 26, No. 8. P. 4664–4670.
- 13 Galadima A., Muraza O. Hydrocracking catalysts based on hierarchical zeolites: A recent progress // *J. Ind. Eng. Chem.* 2018. Vol. 61. P. 265–280.
- 14 Коробицына Л. Л., Величкина Л. М., Восмерилов А. В., Радомская В. И., Астапова Е. С., Рябова Н. В., Агапотова О. А. Синтез и свойства сверх-высококремнеземных цеолитов типа ZSM-5 // *Журнал неорганической химии.* 2008. Т. 53, № 2. С. 209–214.
- 15 ТУ 2177-011-07622236-2008. Цеолитный катализатор КН-30 для использования в процессе “Цеоформинг”, разработанный ЗАО СТК “Цеосит”.
- 16 ГОСТ 33-2016. Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200145229> (дата обращения: 08.05.2021).
- 17 ИСО 12185-1996. Нефть сырая и нефтепродукты. Определение плотности. Метод с применением осциллирующей

- U-образной трубки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=3630660> (дата обращения: 02.05.2021).
- 18 ГОСТ 32139-2019. Нефть и нефтепродукты. Определение содержания серы методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200169772> (дата обращения: 08.05.2021).
- 19 ГОСТ 5066-2018. Топлива моторные. Методы определения температуры помутнения, начала кристаллизации и кристаллизации [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200160608> (дата обращения: 02.05.2021).
- 20 ГОСТ 22254-92. Топливо дизельное. Метод определения предельной температуры фильтруемости на холодном фильтре. М.: Изд-во стандартов, 1992. 15 с.
- 21 ГОСТ 20287-91. Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200005428> (дата обращения: 02.05.2021).
- 22 ГОСТ 2177-99 (ИСО 3405-88). Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава. М.: Изд-во стандартов, 2001. 23 с.
- 23 Сухина О. С., Левашова А. И. Определение группового и структурно-группового составов нефтяных фракций: Методические указания к лабораторной работе для студентов химико-технологического факультета. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. 22 с.
- 24 ISO 4264:2018. Petroleum products – Calculation of cetane index of middledistillate fuels by the four variable equation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/72764.html> (дата обращения: 02.05.2021).