

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ГУДРОНА В ПРИСУТСТВИИ ДИСПЕРСНЫХ И НЕФТЕРАСТВОРИМЫХ СУСПЕНДИРОВАННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ

И.С. Докучаев¹, А.А. Зурнина¹, П.В. Склюев², Н.М. Максимов¹, В.А. Тыщенко¹

¹Кафедра «Химическая технология переработки нефти и газа», Самарский государственный технический университет, ул. Первомайская, 18, Самара, Российская Федерация, 443100

²Кафедра «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», Самарский государственный технический университет, ул. Ново-Садовая, 10, Самара, Российская Федерация, 443100

E-mail: e2.71@mail.ru, anna.zurnina.95@mail.ru, p.v.sklyuev@gmail.com, maximovnm@mail.ru, vladimir.al.tyshchenko@gmail.com

В данной работе представлены результаты исследования превращения гудрона в присутствии мелкодисперсного регенерированного отработанного алюмокобальтмолибденового катализатора гидроочистки в оксидной и сульфидной формах, а также ацетилацетоната марганца и ацетилацетоната кобальта. В качестве определяющего эффективность фактора процесса было выбрано значение выхода светлых фракций. Предложенные образцы катализаторов способны проявлять каталитическую активность в направлении реакций межмолекулярного переноса водорода, что предположительно, и способно привести к увеличению выхода светлых фракций за счет подавления образования продуктов уплотнения. Эксперименты проведены в автоклаве при атмосферном давлении 0,1 МПа, времени контакта 30 мин и температурах 440 и 460 °С. Проведен анализ выхода и состава углеводородного газа, анализ выхода узких фракций процесса, определены физико-химические свойства полученных узких фракций, такие как плотность, содержание серы, йодное число, кинематическая вязкость дизельных фракций, цетановый индекс дизельных фракций. Представлены материальные балансы проведенных процессов. Выполнен сравнительный анализ влияния предложенных образцов катализаторов на результаты процесса крекинга гудрона в присутствии суспендированного катализатора. Рассчитан прирост выхода светлых фракций относительно термических процессов при соответствующих температурах для каждого образца катализатора. Приведены константы скоростей образования светлых фракций, нормированные на количество моль активного компонента образцов катализаторов. Проведено сравнение полученных значений и выполнен анализ эффективности работы каждого из образцов катализаторов. Сделаны выводы о перспективах применения предложенных образцов катализаторов в термодеструктивных процессах переработки тяжелых нефтяных остатков на нефтеперерабатывающих заводах.

Ключевые слова: крекинг, нефтяные остатки, суспендированный катализатор, нефтерастворимый катализатор, отработанный катализатор гидроочистки, ацетилацетонаты

INVESTIGATION OF THE CONVERSION OF VACUUM RESIDUES IN THE PRESENCE OF DISPERSED AND OIL-SOLUBLE SUSPENDED CATALYSTS

I.S. Dokuchaev¹, A.A. Zurnina¹, P.V. Sklyuev², N.M. Maximov¹, V.A. Tyshchenko¹

¹Chair of «Chemical technology of oil and gas processing», Samara State Technical University, Pervomayskaya Str., 18, Samara, Russian Federation, 443100

²Chair of «Development and operation of oil and gas fields», Samara State Technical University, Novo-Sadovaya Str., 10, Samara, Russian Federation, 443100

E-mail: e2.71@mail.ru, anna.zurnina.95@mail.ru, p.v.sklyuev@gmail.com, maximovnm@mail.ru, vladimir.al.tyshchenko@gmail.com

This paper presents the results of a research of the transformation of vacuum residues in the presence of a finely dispersed regenerated aluminum-cobalt-molybdenum hydrotreating catalyst in oxide and sulfide forms, as well as manganese acetylacetonate and cobalt acetylacetonate. The value of the yield of light fractions was chosen as the determining factor of the efficiency of the process. The proposed samples of catalysts are capable of showing catalytic activity in the direction of intermolecular hydrogen transfer reactions, which presumably can lead to an increase in the yield of light fractions by suppressing the formation of compaction products. The experiments were carried out in an autoclave at a pressure of 0.1 MPa, a contact time of 30 minutes and temperatures of 440 and 460 °C. The analysis of the yield and composition of hydrocarbon gas, the analysis of the yield of narrow fractions of the process, the physicochemical properties of the obtained narrow fractions, such as density, sulfur content, iodine number, kinematic viscosity of diesel fractions, cetane index of diesel fractions, were determined. The material balances of the processes carried out are presented. A comparative analysis of the influence of the proposed catalyst samples on the results of the tar cracking process in the presence of a suspended catalyst is performed. The increase in the yield of light fractions relative to thermal processes at the appropriate temperatures for each sample of the catalyst is calculated. The rate constants for the formation of light fractions are given, normalized to the number of moles of the active component of the catalyst samples. The obtained values were compared and the efficiency of each of the catalyst samples was analyzed. Conclusions are drawn about the prospects of using the proposed samples of catalysts in thermdestructive processes of processing heavy oil residues at oil refineries.

Key words: cracking, vacuum residues, suspended catalyst, oil-soluble catalyst, spent hydrotreating catalyst, acetylacetonates

Для цитирования:

Докучаев И.С., Зурнина А.А., Склюев П.В., Максимов Н.М., Тыщенко В.А. Исследование превращения гудрона в присутствии дисперсных и нефтерастворимых суспендированных катализаторов. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2023. Т. LXVII. № 3. С. 3–10. DOI: 10.6060/RCJ.2023673.1.

For citation:

Dokuchaev I.S., Zurnina A.A., Sklyuev P.V., Maximov N.M., Tyshchenko V.A. Investigation of the conversion of vacuum residues in the presence of dispersed and oil-soluble suspended catalysts. *Ros. Khim. Zh.* 2023. V. 67. N 3. P. 3–10. DOI: 10.6060/RCJ.2023673.1.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянно растущий спрос на продукты нефтехимической промышленности создает дефицит мировых нефтяных запасов нефтей, в связи с чем возникает необходимость вовлечения в переработку тяжелых и битуминозных нефтей, а также более эффективного использования потенциала тяжелых нефтяных остатков на нефтехимических предприятиях [1, 2].

Тяжелые нефтяные остатки характеризуются высокими значениями плотности и содержанием большого количества полициклических ароматических углеводородов и гетероорганических соединений, что усложняет их переработку из-за диффузионных ограничений и отравления катализаторов [3, 4].

Актуальным направлением развития нефтеперерабатывающей промышленности является создание технологии по конверсии нефтяных остатков с применением суспендированных катализаторов [5, 6]. Рассматриваемый вариант переработки

имеет преимущество перед используемыми в промышленности традиционными технологиями с точки зрения гибкости применения исходного нефтяного сырья [7–9].

Важным фактором эффективности рассматриваемого процесса является использование катализатора, способствующего перераспределению водорода в системе и повышенной конверсии асфальтосмолистых веществ.

В лабораторной практике существует опыт разработки процессов переработки нефтяных остатков с использованием образцов массивных катализаторов и псевдогомогенных катализаторов, полученных из водо- и нефтерастворимых прекурсоров на основе переходных металлов, таких как Мо [10, 11], Ni [12, 13], Co [14, 15], Fe [16], W [17].

Катализаторы по своему типу в данных процессах подразделяются на дисперсные, представляющие фракции образцов катализаторов, и водо- и нефтерастворимые, которые могут быть получены из прекурсоров в самом сырье процесса *in situ* [18].

В данной работе предлагается исследовать серию катализаторов, включающую дисперсные и нефтерастворимые образцы, способные обеспечить протекание реакций трансфера водорода, что и необходимо для процесса крекинга нефтяных остатков [19, 20].

В качестве твердого дисперсного образца катализатора предлагается использовать регенерированный отработанный алюмокобальтмолибденовый катализатор гидроочистки. Преимуществом данного катализатора является его большая сырьевая база, постоянно пополняющаяся из-за того, что катализаторы гидроочистки после ограниченного количества циклов работы становятся отходом производства [21]. Требования к катализаторам переработки нефтяных остатков не такие жесткие, как к катализаторам гидроочистки, поэтому предложенный образец представляет интерес для исследований его в процессе крекинга с суспендированным слоем катализатора. Также при использовании регенерированного отработанного катализатора гидроочистки в термодеструктивных процессах переработки нефтяных остатков решается проблема утилизации опасных отходов производства [22, 23].

Нефтерастворимые образцы в данной работе представлены солями переходных металлов – ацетилацетонатами кобальта и марганца, которые являются прекурсорами катализаторов. Данные образцы катализаторов полностью растворимы в тяжелом нефтяном сырье, что снимает диффузионные ограничения при переработке, а также исключает проблемы отложения катализатора на стенках технологического оборудования.

Анализ литературных данных показал, что на данный момент недостаточно информации об исследованиях каталитической активности предложенных образцов катализаторов в термодеструктивных процессах.

Цель данной работы – исследование влияния регенерированного отработанного алюмокобальтмолибденового катализатора и ацетилацетонатов кобальта и марганца на результаты процесса крекинга в присутствии катализатора.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве сырья экспериментов по крекингу в присутствии катализатора использован представляющий типичное сырье промышленных установок висбрекинга гудрон (фр. 520-кк) с плотностью 994 кг/м³, кинематической вязкостью при 100 °С 986 мм²/с и содержанием серы 2,44 масс.%.

В качестве катализаторов процесса использовались образцы дисперсного регенерированного отработанного алюмокобальтмолибденового катализатора гидроочистки в оксидной и сульфидной форме, а также нефтерастворимые ацетилацетонаты марганца (Acros Organics, 97%) и кобальта (Acros Organics, 99%), как прекурсоры катализаторов.

Промышленный отработанный образец катализатора был подвержен прокаливанию для удаления кокса и органических примесей при температуре 470 °С в течение 6 ч. Далее прокаленный образец катализатора измельчался в ступке, после чего была отобрана фракция катализатора с размером частиц 0,5-1,0 мм с помощью сит с соответствующим диаметром ячеек.

Определен химический состав полученного образца с использованием рентгенофлуоресцентного анализатора Shimadzu EDX800HS по предварительно построенным калибровочным зависимостям в соответствии с методикой ASTM D-4249.

Пористая структура катализатора была определена методом низкотемпературной адсорбции-десорбции азота на адсорбционном порозиметре Quantochrome Autosorb-1.

Физико-химические свойства образца регенерированного отработанного алюмокобальтмолибденового катализатора гидроочистки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические свойства катализатора
Table 1. Physico-chemical properties of the catalyst

Показатель	Значение
Удельная площадь поверхности, м ² /г	196,6
Удельный объем пор, см ³ /г	0,49
Эффективный диаметр пор, нм	9,13
Содержание СоО, масс.%	4,21
Содержание МоО ₃ , масс.%	24,95

Сульфидирование образцов катализаторов сероводородом в течение 2 ч при 500 °С было выполнено с использованием лабораторной установки проточного типа. Навеска катализатора была загружена в изотермическую зону реактора. По окончании сульфидирования навеска катализатора выгружалась в н-гептан для избежания окисления сульфидов металлов.

В данном исследовании были использованы образцы твердодисперсных катализаторов с размером частиц 0,5-1,0 мм при содержании 0,1 масс.% на сырье процесса согласно экспериментальным данным исследования [19] о наиболее эффективных

условиях применения данного типа катализаторов в термодеструктивных процессах переработки тяжелых нефтяных остатков.

Исследуемые нефтерастворимые предшественники катализаторов представлены ацетилацетонатом марганца (Acros Organics, 97%) и ацетилацетонатом кобальта (Acros Organics, 99%). Содержание образцов нефтерастворимых катализаторов в пересчете на металл составляло 500 ppm на сырье процесса согласно данным из [20].

Эксперименты по исследованию процесса крекинга в присутствии дисперсных катализаторов проведены в автоклаве. В реактор загружалось 270 г сырья и навеска катализатора в необходимом количестве. Процессы проведены при начальном атмосферном давлении при времени контакта на исследуемой температуре равном 30 мин. По завершении эксперимента реактор охлаждался до температуры 25 °С и проводилась выгрузка газа реакции, затем извлекался жидкий продукт превращения и продувался азотом в течение 2 ч для извлечения растворенных газов реакции. Состав газов реакции

определен с использованием газового хроматографа Кристалл-5000.2 с детектором по теплопроводности и гелием в качестве газа-носителя. Жидкий продукт разгонялся на фракции по ГОСТ 2177-99. В результате сводился материальный баланс эксперимента с учетом образования кокса и потерь.

Плотность сырья и полученных фракций определена по ГОСТ 31992.1-2012, йодные числа фр. нк-180 °С и фр. 180-350 °С по ГОСТ 2070-82, кинематическая вязкость фр. 180-350 °С определена по ГОСТ 33-2000, цетановые индексы рассчитаны по ГОСТ 27768, содержание серы в сырье и фракциях определено с помощью рентгенофлуоресцентного анализатора Shimadzu EDX800HS согласно методике ASTM-D-4249.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результатом экспериментов является материальный баланс процесса термического крекинга и крекинга в присутствии катализаторов, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный материальный баланс термического крекинга и термического крекинга в присутствии твердых дисперсных и нефтерастворимых образцов катализаторов

Статья баланса	Выход, масс.%									
	Термический крекинг, °С		Термический крекинг в присутствии твердого дисперсного катализатора, °С				Термический крекинг в присутствии нефтерастворимых катализаторов, °С			
			Оксидная форма		Сульфидная форма		[Mn(C ₅ H ₇ O ₂) ₃]		[Co(C ₅ H ₇ O ₂) ₃]	
	440	460	440	460	440	460	440	460	440	460
Приход:										
Сырье	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Расход:										
Газ	0,3	0,9	0,1	0,7	0,4	0,7	0,1	0,6	0,3	0,7
фр. нк-180 °С	5,7	14,2	8,8	15,2	11,7	12,2	14,2	12,0	8,1	13,0
фр. 180-350 °С	28,2	24,5	28,9	24,6	23,4	25,3	20,5	21,2	24,5	19,7
фр. 350-кк	60,2	22,5	56,4	20,6	55,4	21,3	53,8	22,0	60,5	21,7
Кокс + потери	5,6	37,9	5,8	38,9	9,1	40,5	11,4	44,2	6,6	44,9
Итого:	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Выход светлых, масс.%	33,9	38,7	37,7	39,8	35,1	37,5	34,7	33,1	32,6	32,8
Прирост светлых, масс.%	–	–	3,8	1,1	1,2	-1,2	0,9	-5,6	-1,3	-5,9

Результаты экспериментов показывают, что при температуре 460 °С независимо от варианта исполнения процесса наблюдаются наибольшие значения выхода светлых, относительно процессов при температуре 440 °С, что сопровождается большим выходом бензиновых фракций при увеличении выхода кокса. Также стоит отметить

некоторое снижение выхода дизельной фракции при повышении температуры процесса.

Наибольшая эффективность процесса достигнута при использовании в качестве активного компонента системы твердого дисперсного регенерированного отработанного катализатора гидроочистки. При этом выявлено, что оксидная форма

образца катализатора более предпочтительна ввиду большего выхода светлых фракций, что объясняется большей кислотностью оксидного образца катализатора в процессе.

При крекинге гудрона с использованием катализатора в оксидной форме при переходе от температуры 440 °С к 460 °С происходит повышение выхода бензиновой фракции на 6,4 масс.% при снижении выхода дизельной фракции на 4,3 масс.%. Повышение температуры при использовании сульфидированного образца катализатора сопровождается повышением выхода бензиновой фракции на 0,5 % и выхода дизельной на 1,9 %. Данные исследований свидетельствуют о значительном влиянии температуры процесса на результаты крекинга гудрона в присутствии регенерированного катализатора гидроочистки в оксидной форме, что позволяет сделать вывод о возможности регулирования отношения выхода бензиновой и дизельной фракций при варьировании температурного интервала процесса крекинга в присутствии катализатора.

Прирост выхода светлых фракций относительно термических процессов при соответствующих температурах выше при 440 °С для каждого из образцов катализаторов. Наибольший абсолютный выход светлых фракций достигается при температуре процесса 460 °С и составляет 39,8 масс.% для образца катализатора в оксидной форме.

Эффективное использование ацетилацетонатов металлов в качестве катализаторов процесса крекинга гудрона возможно при температуре 440 °С, что доказывается приростом светлых фракций. При повышении температуры процесса до 460 °С наблюдается снижение выхода светлых фракций, что объясняется интенсификацией реакций уплотнения.

Рассматривая процессы при температуре 440 °С, можно сделать вывод о повышении выхода бензиновых фракций и уменьшении дизельных фракций относительно термического крекинга.

Повышение выхода светлых фракций наблюдается при использовании образца катализатора на основе марганца, что сопровождается значительным приростом выхода бензиновой фракции на 8,5 масс.% при снижении выхода дизельной фракции на 2,2 масс.%.

Рассчитаны константы скорости процесса крекинга гудрона с образованием светлых нефтепродуктов (табл. 3) по формуле расчета константы скорости для модели реакций 1-го порядка:

$$k = \frac{1}{t} \cdot \ln \left(\frac{1}{1-x} \right),$$

где

k – константа скорости реакции;

t – время контакта;

x – конверсия сырья в направлении образования светлых нефтепродуктов.

Таблица 3

Константы скорости реакций по направлению выхода светлых нефтепродуктов в каталитических процессах

Температура, °С	Константа скорости по выходу светлых фракций, ч ⁻¹			
	Катализатор гидроочистки (оксидная форма)	Катализатор гидроочистки (сульфидная форма)	[Mn(C ₅ H ₇ O ₂) ₃]	[Co(C ₅ H ₇ O ₂) ₃]
440	0,94	0,87	0,85	0,79
460	1,01	0,94	0,81	0,79

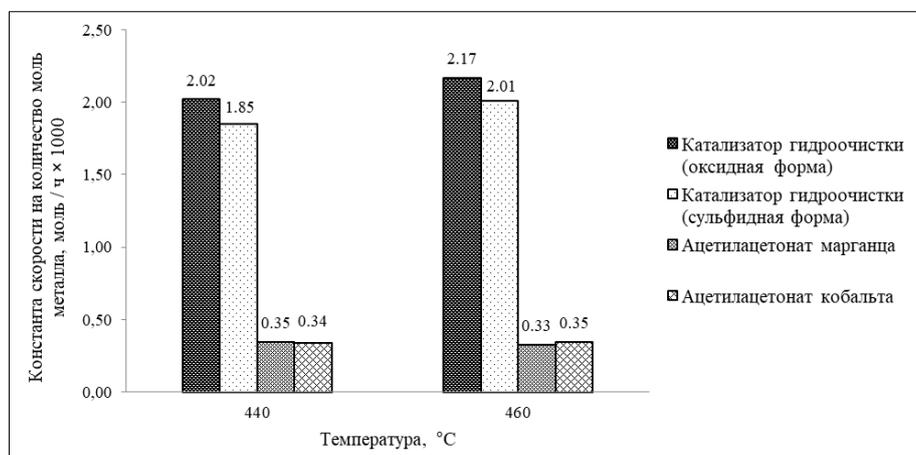


Рис. 1. Сравнение значений констант скоростей реакций, нормированных на количество моль активного металла

Полученные значения констант скоростей реакций согласуются с данными по выходу светлых нефтепродуктов. Сравнение значений констант скоростей реакций в расчете на количество моль активного металла для анализа активности образцов катализаторов представлено на рис. 1.

Полученные данные позволяют сделать вывод о значительно большей активности твердодис-

персного алюмокобальтмолибденового катализатора гидроочистки в оксидной и сульфидной формах в направлении получения светлых фракций в процессе крекинга гудрона.

Физико-химические свойства полученных в результате экспериментов фракций представлены в табл. 4.

Таблица 4

Физико-химические свойства узких фракций термического крекинга и термического крекинга в присутствии твердых дисперсных и нефтерастворимых образцов катализаторов

Физико-химическое свойство	Выход, масс. %									
	Термический крекинг, °С		Термический крекинг в присутствии дисперсного катализатора, °С				Термический крекинг в присутствии нефтерастворимых катализаторов, °С			
			Оксидная форма		Сульфидная форма		[Mn(C ₅ H ₇ O ₂) ₃]		[Co(C ₅ H ₇ O ₂) ₃]	
	440	460	440	460	440	460	440	460	440	460
фр. нк-180 °С										
Плотность, ρ_{15}^{15}	0,764	0,740	0,752	0,732	0,754	0,757	0,738	0,728	0,782	0,754
Йодное число, г I / 100 г	46,1	32,5	33,8	28,1	34,1	33,0	40,8	35,8	42,8	35,3
Содержание серы, ppm	7870	5022	8134	4562	6629	5386	5999	5088	6012	5451
фр. 180-350 °С										
Плотность, ρ_{15}^{15}	0,861	0,860	0,873	0,868	0,859	0,871	0,866	0,852	0,861	0,861
Кинематическая вязкость, ν_{20}	3,90	3,05	4,85	3,30	4,10	3,87	4,43	2,74	4,01	2,97
Йодное число, г I / 100 г	24,4	21,6	29,6	22,0	27,6	27,5	38,7	25,2	33,7	26,5
Цетановый индекс	43,9	38,8	50,2	39,5	52,5	40,7	50,9	44,5	50,5	41,2
Содержание серы, %	1,14	1,16	1,25	1,09	1,45	1,27	1,49	1,09	1,44	1,19
фр. 350-кк										
Плотность, ρ_{15}^{15}	1,006	1,061	0,999	0,977	0,998	1,043	0,999	0,981	1,002	0,988

Бензиновые фракции процессов полностью соответствуют требованиям ГОСТ 32513-2013 по допустимым значениям плотности. При этом фракции полученные при температуре процесса 460 °С характеризуются меньшими значениями.

Плотность полученных дизельных фракций характеризуются повышенными значениями плотностей, не соответствующими требованиям ГОСТ 32511-2013.

Значения кинематической вязкости дизельных фракций полностью соответствуют ГОСТ 32511-2013, при этом образцы, полученные из катализаторов при температуре 460 °С характеризуются меньшими значениями.

Расчетный цетановый индекс дизельных фракций соответствует требованиям ТУ 38.401-58-110-94 при температуре процесса 440 °С.

Значения йодных чисел полученных бензиновых фракций меньше, чем у соответствующих дизельных фракций. Также наблюдается тенденция к уменьшению значений йодных чисел при повышении температуры процесса.

Содержание серы в полученных бензиновых и дизельных фракциях превышает допустимые значения в соответствии с ГОСТ.

Светлым фракциям исследуемых вариантов термодеструктивных процессов требуется доработка на установках гидрооблагораживания для удаления серосодержащих соединений и некоторого снижения значений плотности. Бензиновые фракции нуждаются в повышении октанового числа на установках вторичных процессов переработки. Доведение физико-химических свойств дизельных фракций до соответствия с ГОСТ на

нефтеперерабатывающих заводах возможно при помощи переработки на установках гидрогенизационных процессов, а также добавления цетанповышающих присадок и компаундирования.

ВЫВОДЫ

В данной работе исследовано влияние образцов дисперсных и нефтерастворимых катализаторов, представленных образцами регенерированного отработанного катализатора гидроочистки в оксидной и сульфидной формах, а также катализаторов, полученных из ацетилацетонатов марганца и кобальта на результаты крекинга гудрона.

Использование в качестве катализатора процесса регенерированного отработанного алюмокобальтмолибденового катализатора гидроочистки обеспечивает наибольшие значения выхода светлых фракций. Наибольший прирост светлых фракций при переработке гудрона (3,8 масс.% при 440 °С и 1,1 масс.% при 460 °С) и наибольший абсолютный выход светлых фракций (37,7 масс.% при 440 °С и 39,8 масс.% при 460 °С) достигается при использовании образца катализатора в оксидной форме, что может быть связано с его большей кислотностью. При повышении температуры процесса численно увеличивается отношение выхода бензиновая/дизельная фракции (с 0,305 при 440 °С до 0,610 при 460 °С). Выявленные закономерности позволяют сделать вывод о возможности регулирования выхода бензиновой и дизельной фракций температурой процесса.

Нефтерастворимый ацетилацетонат марганца в процессе крекинга гудрона позволяет получить прирост светлых фракций относительно термического процесса при температуре 440 °С. При использовании ацетилацетоната кобальта наблюдается увеличение выхода фр. 350-кк и кокса, что объясняется повышением скорости образования продуктов уплотнения. Использование ацетилацетонатов металлов в процессе крекинга гудрона при повышенных температурах до 460 °С приводит к понижению выхода светлых фракций за счет интенсификации побочных реакций уплотнения.

Общий выход светлых в процессе при 440 °С с использованием ацетилацетоната марганца составляет 34,7 масс.% (прирост светлых относительно термического крекинга составляет 0,9 масс.%), а в процессе с ацетилацетонатом кобальта 32,6 масс.%, что указывает на большую селективность по светлым фракциям образца катализатора, содержащего марганец.

При использовании ацетилацетоната кобальта при 440 °С выше выход дизельной фракции

относительно процесса в качестве катализатора в котором применяется ацетилацетонат марганца (24,5 масс.% и 20,5 масс.% соответственно), но ниже значение выхода бензиновой фракции (8,1 масс.% и 14,2 масс.% соответственно).

Выполнено сравнение значений констант скоростей реакций по направлению образования светлых нефтепродуктов в пересчете на количество активного компонента каждого из образцов катализаторов.

Полученные данные свидетельствуют о превышении значений констант скоростей реакций процессов с регенерированным отработанным катализатором гидроочистки в оксидных и сульфидных формах в 5,3-5,9 раз при 440 °С и в 5,7-6,6 раз при 460 °С относительно процессов с использованием ацетилацетонатов марганца и кобальта.

Анализ физико-химических свойств свидетельствует о необходимости переработки полученных нефтяных фракций во вторичных гидрогенизационных процессах для уменьшения содержания серы, повышения октанового числа у бензиновых и цетанового индекса у дизельных фракций для достижения соответствия полученных нефтепродуктов требованиям ГОСТ.

Результаты проведенного исследования позволяют сделать вывод об эффективности использования выделенных твердодисперсных и нефтерастворимых образцов катализаторов, в качестве активных компонентов которых применяются переходные металлы, в процессе крекинга тяжелых нефтяных остатков за счет реакций перераспределения водорода.

Исследованный процесс, ввиду его эффективности и малых капитальных и эксплуатационных затрат, имеет перспективу внедрения в промышленность и его реализацию на действующих установках висбрекинга путем их незначительной модернизации.

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

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Kang K.H., Nguyen N.T., Pham D.V. Journal of Catalysis. 2021. V. 402. P. 194–207. DOI: 10.1016/j.jcat.2021.08.030.
2. Al-Attas T.A., Ali S.A., Zahir Md H. Energy Fuels. 2019. V. 33. P. 7917–7949. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b01532.
3. Lim S.H., Go K.S., Nho N.S. et al. Fuel. 2018. V. 234. P. 305-311. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.06.113.

4. Kang K.H., Kim G.T., Park S. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2019. V. 76. P. 1–16.
5. Kolchina, G.Y., Poletaeva, O.Y., Leontev, A.Y., Movsumzade, E.M., Loginova, M.E., Kolchin, A.V. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. T. 66. N 6. P. 94–101. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6783.
6. Sahu R., Song B.J., Im J.S. *J. Ind. Eng. Chem.* 2015. V. 27. P. 12–24. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.01.011.
7. Lee D., Lee Y.-K. *Journal of Catalysis*. 2022. V. 413. P. 443–454. DOI: 10.1016/j.jcat.2022.06.037.
8. Jeong H-R, Lee Y-K. *Appl Catal A Gen.* 2019. V. 572. P. 90–96. DOI: 10.1016/j.apcata.2018.12.019.
9. Kim K-D, Lee Y-K. *J. Catal.* 2019. V. 239. P. 111–21. DOI: 10.1016/j.jcat.2020.07.009.
10. Kang K.H., Nguyen N.T., Seo P.W. *Journal of Catalysis*. 2020. V. 384. P. 106–121. DOI: 10.1016/j.jcat.2020.02.007.
11. Cui Q.-Y., Zhang H.-B., Wang T.-H. *Petroleum Science*. 2021. V. 18. P. 1867–1876 DOI: 10.1016/j.petsci.2021.09.019.
12. Yang T., Liu C., Deng W. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2019, V. 58. P. 41 DOI: 10.1021/acs.iecr.9b04529.
13. Luo H., Sun J., Deng W. *Fuel*. 2022. V. 321. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124029.
14. Chen Y., Lu Y., Guan Z. *Fuel*. 2022. V. 315. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123134.
15. Kim S.-H., Kim K.-D., Lee D. *Journal of Catalysis*. 2018. V. 364. P. 131–140. DOI: 10.1016/j.jcat.2018.05.002.
16. Kadiev K.M., Zekel L.A., Gyulmaliev A.M. *Petroleum Chemistry*. 2018. DOI: 10.1134/S0965544118140025.
17. López-Mendoza M.A., Nava R., Millán-Malo B. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2023. V. 14. DOI: 10.1016/j.ceja.2023.100454.
18. Al-Attas T.A., Ali S.A., Zahir M.H. *Energy Fuels*. 2019. V. 33. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b01532.
19. Докучаев И.С., Зурнина А.А., Максимов Н.М. *Мир нефтепродуктов*. 2023. № 2. С. 28–36. DOI: 10.32758/2782-3040-2023-0-2-28-36. – EDN JPAPVX.
Dokuchaev I.S., Zurnina A.A., Maximov N.M. *World of petroleum products*. 2023. N 2. P. 28–36. (in Russian). DOI: 10.32758/2782-3040-2023-0-2-28-36. – EDN JPAPVX.
20. Тимошкина В.В., Зурнина А.А., Максимов Н.М. *Наногетерогенный катализ*. 2019. Т. 4. № 2. С. 79–88. DOI: 10.1134/S2414215819020126. – EDN ISLKEO.
Timoshkina V.V., Zurnina A.A., Maximov N.M. *Nanoheterogeneous catalysis*. 2019. V. 4. N 2. P. 79–88. (in Russian). DOI: 10.1134/S2414215819020126. – EDN ISLKEO.
21. Cai Y., Ma L., Xi X. *Hydrometallurgy*. 2022. V. 208. DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105800.
22. Докучаев И.С., Максимов Н.М., Тыщенко В.А. *Российский химический журнал*. 2022. Т. 66. № 1. С. 81–89. DOI: 10.6060/rcj.2022661.9.
Dokuchaev I.S., Maximov N.M., Tyshchenko V.A. *Russian Chemical Journal*. 2022. V. 66. N 1. P. 81–89. DOI: 10.60/rcj.2022661.9.
23. Tran T.T., Lee M.S. *Separation and Purification Technology*. 2020. V. 247.

*Поступила в редакцию 29.04.2023
Принята к опубликованию 17.09.2023*

*Received 29.04.2023
Accepted 17.09.2023*