

УДК 66.095.92

## ИЗУЧЕНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Fe-ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКАТАЛИЗАТОРОВ СИНТЕЗА ФИШЕРА–ТРОПША МЕТОДАМИ ДИНАМИЧЕСКОГО СВЕТОРАССЕЯНИЯ И ИК-ФУРЬЕ СПЕКТРОСКОПИИ

© 2016 г. Г. Н. Бондаренко<sup>1</sup>, М. В. Куликова<sup>1</sup>, А. Х. Аль Хазраджи<sup>2</sup>,  
О. С. Дементьева<sup>1</sup>, М. И. Иванцов<sup>1</sup>, М. В. Чудакова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Московский технологический университет (МИТХТ), г. Москва

E-mail: m\_krylova@ips.ac.ru

Поступила в редакцию 12.05.2016 г.

Изучены каталитические и структурные свойства ультрадисперсных, в том числе наноразмерных, Fe-полимерных катализаторов синтеза Фишера–Тропша. Использование методов динамического светорассеяния и ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения позволило проанализировать структурные особенности полимерной матрицы, окружающей активную металлосодержащую наночастицу, и связать их с каталитической активностью в синтезе Фишера–Тропша.

**Ключевые слова:** синтез Фишера–Тропша, ультрадисперсные и наноразмерные железные катализаторы, трехфазные сларри-реакторы, ИК-Фурье спектроскопия

**DOI:** 10.1134/S2414215816020039

Трехфазные системы газ–жидкость–твердое тело, реализуемые в сларри-реакторах [1], считаются в настоящее время наиболее перспективными для проведения процессов гидрирования CO, в частности для синтеза Фишера–Тропша. В этой системе в жидкой фазе распределяются микрометрические гранулы активированного катализатора, которые удерживаются в зоне реакции потоком реакционной среды. Поддержание стабильности такой системы представляется затруднительным, учитывая ее сложные гидродинамические характеристики и склонность к расслоению. Эта проблема может быть решена путем использования высокодисперсных, наноразмерных катализаторов, свойства которых существенно отличаются от гранулированных макрометрических контактов.

Ранее авторами [2] было продемонстрировано, что уменьшение размера частиц твердой фазы суспензии заметно снижает склонность системы к расслоению и приводит к существенному увеличению удельной активности катализатора синтеза Фишера–Тропша. Ультрадисперсные катализаторы могут быть сформированы и активированы непосредственно в дисперсионной среде с применением в качестве стабилизирующего компонента полимерных систем [3]. При этом большее значение для катализа имеют размеры и физико-химические свойства, механизмы образова-

ния ультрадисперсных частиц, в предельном случае наночастиц [4].

В данной работе изучены каталитические и структурные особенности ультрадисперсных катализаторов синтеза Фишера–Тропша.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Ультрадисперсные, в том числе наноразмерные, Fe-полимерные катализаторы синтеза Фишера–Тропша готовили термическим разложением раствора прекурсора при 280°C при перемешивании в токе инертного газа в дисперсионной среде. В качестве дисперсионной среды использовали расплавленный нефтяной парафин П-2 с добавлением в качестве стабилизатора 10 мас. % одного из полимеров: поливинилового спирта (ПВС), полиамида (ПА), полиэтилена (ПЭ), сополимер стирола с дивинилбензолом (ССДВБ), полиакрилонитрила (ПАН), полистирола (ПС).

Размер частиц синтезированных образцов определяли методом динамического светорассеяния на приборе Malvern Zetasizer Nano ZS. Пробоподготовку осуществляли растворением 0.01 г образца в 10 мл *n*-гексана с добавлением 5 мас. % ПАВ (натрия диоктилсульфосукцината).

**Таблица 1.** Влияние полимера, добавленного в дисперсионную среду в количестве 10 мас. %, на размер частиц железного катализатора

Введенный полимер	Средний размер частиц, нм		Количественное содержание, %	
	≥400 нм	<400 нм	≥400 нм	<400 нм
Поливиниловый спирт	680	136	14	86
Полиамид	932	236	55	45
Сополимер стирола с дивинилбензолом	669	180	17	83
Полиакрилонитрил	872	274	26	74
Полиэтилен	455	2	2	98
Полистирол	677	2	1	99
В отсутствие полимера	458	—	100	—

Синтез проводили в проточной каталитической установке с перемешиванием (в “сларри-реакторе”) с катализатором, суспендированным в дисперсионной среде, при давлении 2 МПа и нагрузке по синтез-газу 2 л/гКт ч (синтез-газ с мольным отношением  $\text{CO} : \text{H}_2 = 1 : 1$ ) в интервале температур 220–320°C. Подъем температуры осуществляли ступенчато (на 20°C каждые 12 ч). В конце каждого изотермического режима осуществляли отбор проб газа и жидкости на анализ.

Исходный синтез-газ и газообразные продукты синтеза анализировали методом газо-адсорбционной хроматографии на хроматографе “Кристаллюкс-4000”. Детектор – катарометр, газ-носитель – гелий. Использовали две хроматографические колонки. Для разделения  $\text{CO}$  и  $\text{N}_2$  применяли колонку, заполненную молекулярными ситами  $\text{CaA}$  (3 м × 3 мм), при изотермическом режиме 80°C. Для разделения  $\text{CO}_2$  и углеводородов  $\text{C}_1\text{--C}_4$  использовали колонку, заполненную *Naue Sep R* (3 м × 3 мм); режим программированный 80–200°C, 8°C/мин.

Для оценки активности катализатора были выбраны следующие показатели: удельная активность (количество молей  $\text{CO}$ , прореагировавших на 1 г Fe за 1 с), конверсия  $\text{CO}$  (процентное отношение массы прореагировавшего  $\text{CO}$  к массе  $\text{CO}$ , вошедшего в реакционную зону), выход продуктов (количество граммов продукта, полученного при пропускании через катализатор 1 м<sup>3</sup> синтез-газа, приведенного к нормальным условиям), селективность (процентное отношение углерода, пошедшего на образование продукта реакции, к общему количеству углерода, введенному в зону реакции), производительность (количество продуктов, производимых 1 кг катализатора за 1 ч).

ИК-Фурье-спектры всех образцов регистрировались для твердой фазы в режиме отражения

методом нарушенного полного внутреннего отражения при использовании ИК микроскопа HYPERION-2000, сопряженного с ИК-Фурье спектрометром IFS-66 v/s Bruker (кристалл Ge, разрешение 2 см<sup>-1</sup>, диапазон 4000–600 см<sup>-1</sup>, 100 скан.).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом динамического светорассеяния установлено (табл. 1), что в катализаторе без добавления полимера частицы представлены исключительно фракцией с размером 458 нм. Показано, что добавление стабилизирующего агента – полимера – способствует образованию частиц меньшего размера, причем природа полимера влияет не только на размер образующихся частиц, но и на долю более мелких частиц в общем распределении по размерам (табл. 1). Так, введение в систему таких полимеров как полиэтилен и полистирол позволяет получить фракцию на 98–99% состоящую из частиц с размером 2 нм. Использование в качестве стабилизирующего компонента полиакрилонитрила и полиамида приводит к образованию бимодальной фракции, состоящей из частиц с размером частиц 872–932 и 236–274 нм, однако, количественное содержание частиц существенно различается: в случае полиакрилонитрила преобладают более мелкие частицы, а в случае полиамида – более крупные. Как известно, размер частиц металла, вернее сказать распределение по размерам, в катализаторах синтеза Фишера–Тропша во многом определяет активность и селективность контактов [5, 6].

Из данных (табл. 1, 2) видно, что природа полимера значительно влияет как на размер частиц, так и на основные показатели синтеза Фишера–Тропша. Установлено, что оптимальная температура синтеза (температура, при которой наблюда-

**Таблица 2.** Основные показатели синтеза Фишера–Тропша в присутствии катализаторов Fe-парафин-полимер

Полимерный компонент	Оптимальная температура синтеза, °С	Конверсия CO, %	Выход жидких углеводородов, г/м <sup>3</sup>	Удельная активность $\frac{\text{моль}_{\text{CO}}}{\Gamma_{\text{Металла}} \text{ с}} (10^{-6})$	Производительность по жидким углеводородам, г/кг <sub>Металла</sub> ч
Поливиниловый спирт	320	69	66	6	99
Полиамид	280	16	33	1	49
Сополимер стирола с дивинилбензолом	320	71	63	6	94
Полиакрилонитрил	320	80	91	7	137
Полиэтилен	300	17	29	1	43
Полистирол	300	15	26	1	39
В отсутствие полимера	320	76	72	6	108

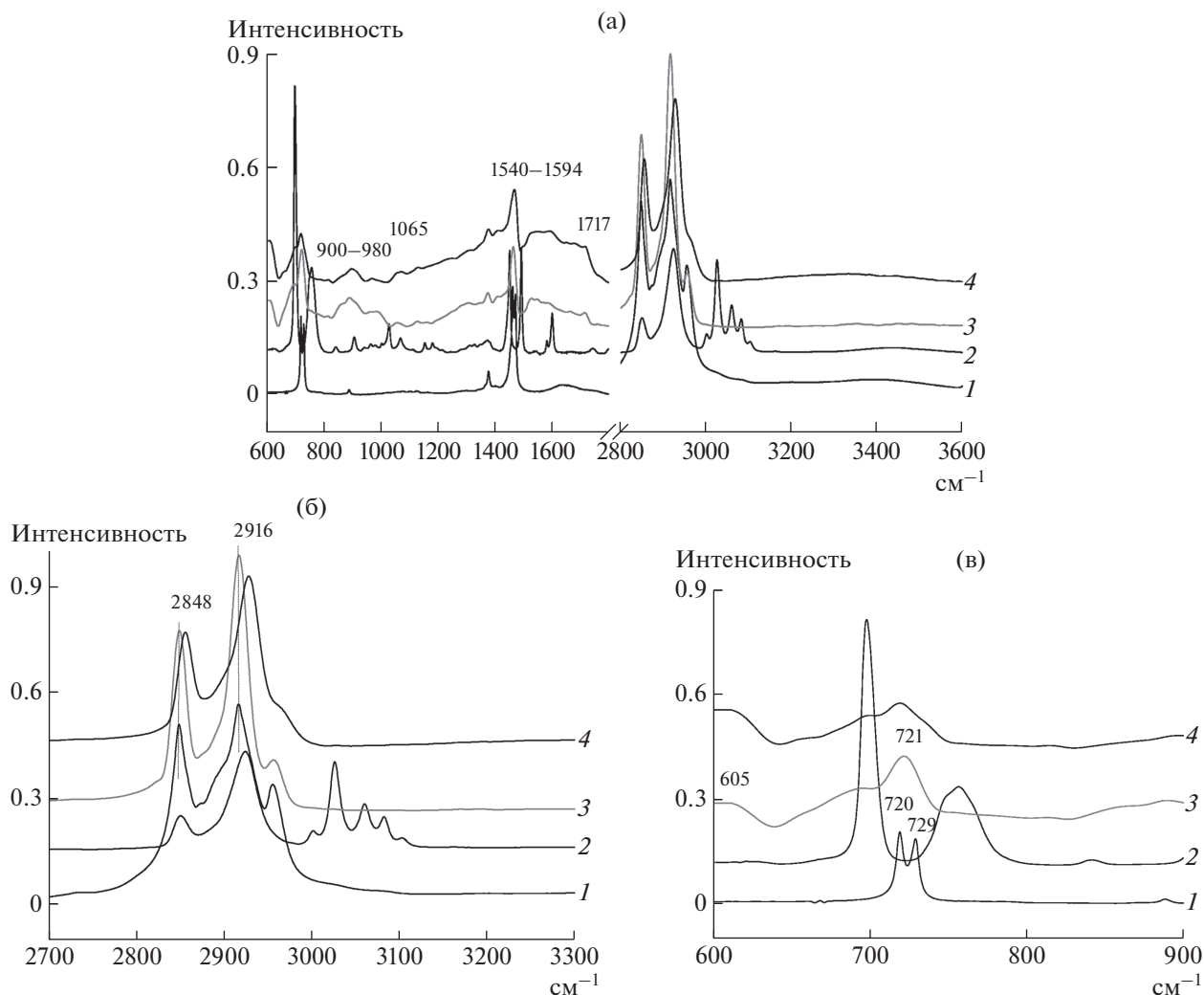
ется максимальный выход жидких углеводородов) различалась в зависимости от используемого полимера.

Размер частиц в катализаторах с добавлением полиэтилена и полистирола составил 2 нм, однако удельная активность данных контактов не превышала  $1 \times 10^{-6}$  моль<sub>CO</sub>/Г<sub>Металла</sub> с, что в 6 раз ниже аналогичного показателя для катализатора, не содержащего в своем составе полимерного компонента. Для катализатора Fe-ПА-парафин наблюдалось бимодальное распределение частиц по размеру: 932 и 236 нм, при этом удельная активность также не превышала  $1 \times 10^{-6}$  моль<sub>CO</sub>/Г<sub>Металла</sub> с. Использование таких полимеров как поливиниловый спирт и сополимер стирола с дивинилбензолом приводило к образованию частиц преимущественно размером 136–180 нм, и удельная активность для данных катализаторов составляла  $6 \times 10^{-6}$  моль<sub>CO</sub>/Г<sub>Металла</sub> с. Самой высокой удельной активностью обладал контакт на основе полиакрилонитрила, дисперсная фаза которого на 74% состояла из частиц с размером 274 нм. Максимальный выход целевого продукта – жидких углеводородов C<sub>5+</sub> – достигался также в присутствии образца, содержащего в своем составе полиакрилонитрил, и соответствовал 91 г/м<sup>3</sup>, что на 20 г/м<sup>3</sup> больше, чем в присутствии катализатора без полимерного компонента, и существенно превышало значения выхода жидких углеводородов на катализаторах, содержащих другие полимеры. Существенное уменьшение размера каталитических частиц (до 2 нм) не способствует повышению активности контакта в целом, что коррелирует с литературными данными [7].

Однако в данном случае нельзя однозначно утверждать, с чем именно связана низкая активность образцов, содержащих в своем составе полиэтилен и полистирол: с размерным эффектом или с блокировкой активного центра полимерной оболочкой, т.е. капсуляцией. Подобный эффект капсуляции активного центра и, как следствие, падение активности катализаторов синтеза Фишера–Тропша, описан авторами в [8].

Из ИК-спектров образцов с добавлением полиэтилена и полистирола, содержащих наноразмерные частицы композитов (рис. 1а), видно, что в ходе приготовления катализатора нитрат железа разлагается с образованием оксида железа, что подтверждается наличием интенсивной широкой полосы в области 605–620 см<sup>-1</sup>, которая характерна для Fe=O связей оксида железа, при этом в спектре отсутствует полоса нитрат-аниона в области 1100 см<sup>-1</sup>. В ходе формирования катализатора может происходить окисление парафина, о чем свидетельствует появление новых полос в областях 1717 см<sup>-1</sup> (ν<sub>C=O</sub>) и 900–1060 см<sup>-1</sup> (ν<sub>C-O</sub>), однако, интенсивность этих полос невысока, т.е. степень окисления парафина в синтезированном катализаторе незначительна. Следует отметить, что ИК-спектр катализатора Fe-ПЭ-парафин близок к ИК-спектру парафина, тогда как в ИК-спектре катализатора Fe-ПС-парафин отсутствуют характерные полосы полистирола, что может быть следствием того, что слой парафина на поверхности частиц не позволяет зафиксировать спектр тонкого слоя полимера, связанного непосредственно с металлом.

Анализ спектральной области валентных (рис. 1б) и особенно деформационных (рис. 1в)



**Рис. 1.** ИК-спектры парафина, полистирола и катализаторов Fe-ПЭ-парафин, Fe-ПС-парафин: (а) – обзорный спектр, (б) – детализация в области валентных колебаний связей С–Н, (в) – детализация в области деформационных колебаний связей С–Н. 1 – парафин; 2 – ПС; 3 – Fe-ПЭ-парафин; 4 – Fe-ПС-парафин.

колебаний насыщенных цепочек  $(\text{CH}_2)_n$ , позволяет заключить, что парафин на поверхности каталитической частицы претерпевает структурные изменения в ходе формирования катализатора. В области  $700\text{--}730\text{ см}^{-1}$  в спектре парафина проявляется две полосы от неплоских деформационных колебаний  $\text{CH}_2$ -групп: полоса  $720\text{ см}^{-1}$  характерна для любой метиленовой группы и полоса  $729\text{ см}^{-1}$  возникает только в спектрах углеводородов с достаточными длинными упорядоченными цепями и возрастает по интенсивности с увеличением степени кристалличности образца. В спектре катализаторов с добавлением полиэтилена и полистирола в этой области проявляется одна широкая полоса с максимумом  $721\text{ см}^{-1}$ , а полоса при  $729\text{ см}^{-1}$  отсутствует. Такие изменения в области полос от  $\text{CH}_2$ , а также сдвиги полос в области валентных колебаний  $\nu\text{ CH}_2$  (табл. 3), позволяют заключить, что в

спектре катализатора Fe-ПЭ-парафин полимер не проявляется, а парафин на поверхности каталитической частицы имеет совершенно другой конформационный набор насыщенных молекул, степень кристалличности которых значительно ниже, чем в исходном парафине, или полностью отсутствует.

Несколько иная картина наблюдается в ИК-спектре железного катализатора, приготовленного в тех же условиях, но без полимеров (рис. 2). В спектре катализатора Fe-парафин наблюдаются все признаки окисления парафина, причем относительная интенсивность полосы от двойных связей  $\text{C}=\text{O}$  ( $1720\text{ см}^{-1}$ ) значительно выше, чем в спектрах катализаторов с добавлением полиэтилена и полистирола (рис. 1). Интенсивная полоса  $607\text{ см}^{-1}$  от  $\text{Fe}=\text{O}$  связей и отсутствие полосы  $1100\text{ см}^{-1}$  от нитрат-аниона свидетельствует о том, что введение поли-

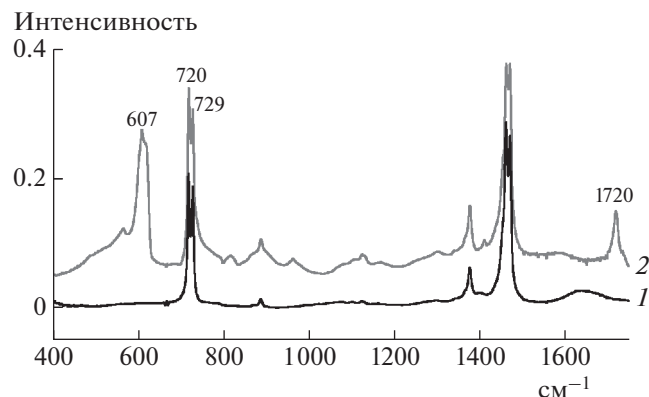
**Таблица 3.** Относительные интенсивности полос ИК-спектров  $(\text{CH}_2)_n$  образца Fe-ПЭ-парафин

Интенсивность ( $D$ ) полос ( $\text{см}^{-1}$ )	Относительные интенсивности		
	парафин	Fe-парафин	Fe-ПЭ-парафин
$D_{2848}/D_{2916}$	0.582	0.434	0.261
$D_{729}/D_{720}$	0.919	0.836	—

мера в дисперсионную среду не влияет на протекание реакции разложения прекурсора – нитрата железа(III) до оксида.

Наличие в ИК-спектре Fe-парафина двух полос в области  $\gamma \text{CH}_2$   $720 \text{ см}^{-1}$  и  $729 \text{ см}^{-1}$  указывает на сохранение упорядоченных звеньев  $(\text{CH}_2)_n$ , в отличие от катализатора Fe-ПЭ-парафин (рис. 1), в спектре которого проявлялась только одна полоса в этой области при  $721 \text{ см}^{-1}$ .

Относительная интенсивность полос валентных и деформационных колебаний в спектре Fe-парафин меняется по сравнению со спектром чистого парафина (табл. 3), из чего можно заключить, что присутствие полимера в составе катализатора ингибирует окислительные процессы и существенно влияет на структурные преобразования парафиновых цепей. Можно полагать, что окисление парафина происходит при непосредственном контакте его с оксидом железа, а наличие даже тончайшей пленки полимера изолирует парафин от непосредственного контакта, при этом парафиновые цепи, обволакивая частицу, покрытую полимером, претерпевают более глубокие структурные изменения. Такая структура каталитической частицы, вероятно, создает препятствия для подхода субстрата непосредственно к металлу и, несмотря на малый размер частиц (2 нм), данные контакты не обладают высокой активностью в синтезе Фишера–Тропша.



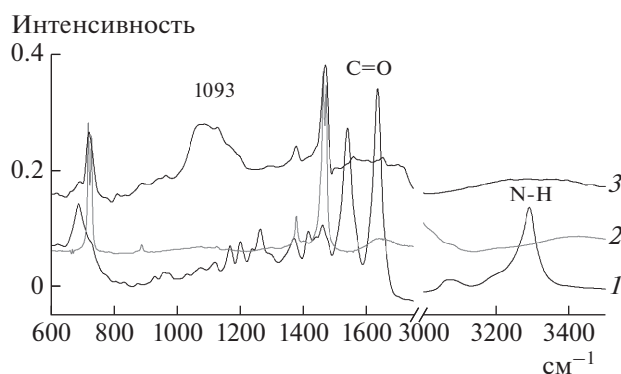
**Рис. 2.** ИК-спектры парафина и катализатора Fe-парафин. 1 – парафин; 2 – Fe-парафин.

В ИК-спектре катализатора Fe-ПА-парафин полностью отсутствуют полосы от N–H группы, имеющие в спектре исходного полимера очень высокую интенсивность, при этом присутствуют полосы окисленного и утратившего кристалличность парафина (рис. 3).

Отличительной особенностью ИК-спектра катализатора с добавлением ПА является ничтожно малая интенсивность полосы Fe=O связей ( $607 \text{ см}^{-1}$ ) и широкая интенсивная полоса нитрат-аниона в области  $1093 \text{ см}^{-1}$ , что свидетельствует о том, что в условиях формирования данного катализатора превращение нитрата железа в оксид происходит неполностью.

Следует отметить, что, несмотря на значительные различия в размерах частиц в катализаторах с добавлением полиэтилена, полистирола и полиамида, (2 нм (98%), 2 нм (99%), 932 и 236 нм (55 и 45%)), соответственно (табл. 1)), спектральные характеристики данных контактов достаточно близки и свидетельствуют о присутствии на поверхности оксидной частицы тонкого слоя полимера, покрытого парафином, так, что при этом спектральные признаки полимера отсутствуют, вследствие чего, частицы катализатора, вероятно, проявляют низкую активность в синтезе Фишера–Тропша (табл. 2).

На рис. 4 представлены ИК-спектры исходного полиакриламида, катализатора с добавлением ПАН и катализатора на основе ПАН с добавкой



**Рис. 3.** ИК-спектры парафина, полиамида и катализатора Fe-ПА-парафин. 1 – ПА; 2 – парафин; 3 – Fe-ПА-парафин.

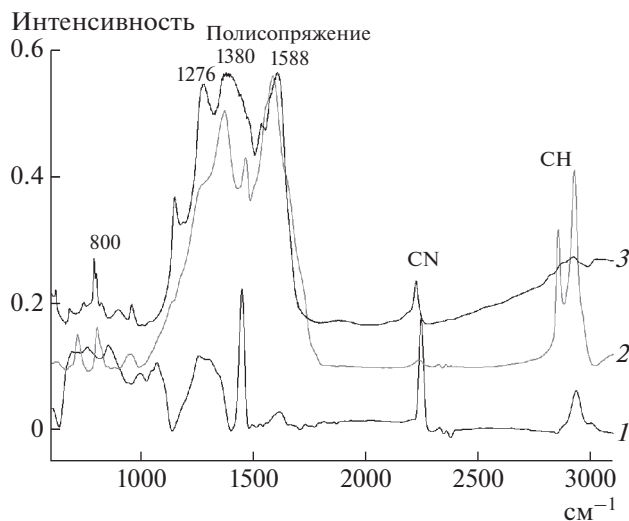


Рис. 4. ИК-спектры полиакрилонитрила и катализаторов Fe-ПАН-парафин и Fe-ПАН-Pd (ИК-пиролиз). 1 – ПАН; 2 – Fe-ПАН-парафин; 3 – Fe-ПАН-Pd (ИК-пиролиз).

0.2% PdCl<sub>2</sub>, пиролизованного в лабораторной установке импульсного фотонного отжига (Ar, 200°C, 15 мин). На ИК-спектре катализатора Fe-ПАН-парафин проявляются очень интенсивные плохо разрешенные полосы 1588, 1380, 1276 см<sup>-1</sup> и полоса средней интенсивности 800 см<sup>-1</sup>, характерные для коротких участков системы сопряженных связей, формирующейся при пиролизе полиакриламида [9]. При этом нитрильные группы ПАН в образце катализатора практически полностью превратились в сопряженные связи –C=N–C=N–, о чем свидетельствует малая интенсивность полосы 2244 см<sup>-1</sup> от нитрильных групп ПАН и очень высокая интенсивность полос от системы полисопряженных двойных связей. Также в спектре присутствуют интенсивные полосы парафина  $\nu_{\text{CH}}$  (2980–2840 см<sup>-1</sup>),  $\delta_{\text{CCH}}$  (1450 см<sup>-1</sup>),  $\gamma_{\text{CH}_2}$  (721 см<sup>-1</sup>).

Наличие участков полисопряжения в полимерной пленке Fe-содержащей наночастицы, по всей вероятности, способствует формированию активных центров в синтезе Фишера–Тропша, поскольку железо может образовывать  $\pi$ -комплексы с сопряженными связями полимера [9]. Данное предположение соотносится с данными каталитической активности, поскольку именно катализатор с добавлением ПАН проявил самую высокую активность в реакции образования углеводородов из CO и H<sub>2</sub> – выход целевого продукта достигал 91 г/м<sup>3</sup> (табл. 2).

При использовании в качестве стабилизатора таких полимеров как поливиниловый спирт и сополимера стирола с дивинилбензолом на ИК-спектрах

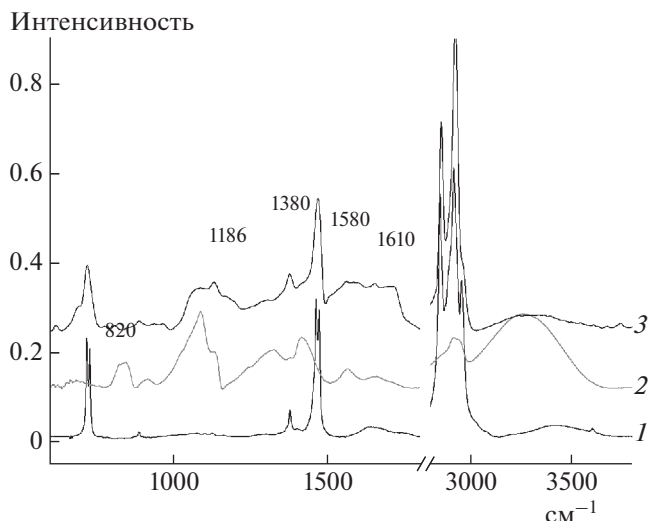
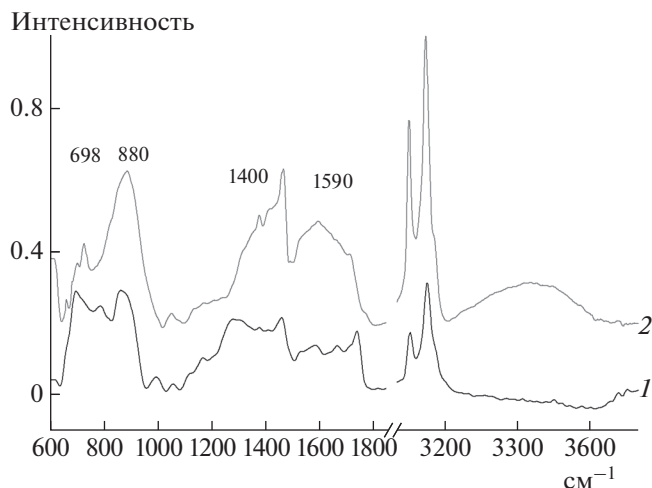


Рис. 5. ИК-спектры парафина, поливинилстирола и катализатора Fe-ПВС-парафин. 1 – парафин; 2 – ПВС; 3 – Fe-ПВС-парафин.

(рис. 5, 6), как и в случае катализатора Fe-ПАН-парафин (рис. 4), присутствуют полосы, характеризующие полисопряженные связи, однако гораздо меньшей интенсивности. Стоит отметить, что активность данных контактов в синтезе Фишера–Тропша ниже, чем активность контакта на основе полиакрилонитрила – выход углеводородов C<sub>5+</sub> не превышал 66 г/м<sup>3</sup> (табл. 2). Кроме того, в ИК-спектрах катализаторов на основе поливинилового спирта и сополимера стирола с дивинилбензолом проявляются характеристические полосы исходного полимера, поэтому полосы полисопряженной системы тоже немного сдвигаются, как это отмечено для дефектной полисопряженной системы пиролизованного полиакрилонитрила [10]. Именно это отличие, по всей видимости, приводит к более низкой каталитической активности в синтезе Фишера–Тропша по сравнению с катализатором Fe-ПАН-парафин, однако выход целевого продукта в 2 раза превышает аналогичный показатель для катализаторов на основе полиэтилена полистирола и полиамида, в спектрах которых не наблюдались участки полисопряжения.

Таким образом, методами динамического светорассеяния и ИК-Фурье-спектроскопии установлено, что природа полимера, используемого в качестве прекурсора катализатора синтеза Фишера–Тропша, значительно влияет на структурные характеристики катализатора. Показано, что добавление стабилизирующего агента (полимера) способствует образованию частиц меньшего размера, причем природа полимера влияет не только на размер образующихся частиц, но и на долю более мелких частиц в общем распределении по размеру.



**Рис. 6.** ИК-спектры сополимера стирола с дивинилбензолом и катализатора Fe-ССДВБ-парафин. 1 – ССДВБ; 2 – Fe-ССДВБ-парафин.

Определено, что в ходе формирования каталитической системы нитрат железа превращается в оксид, а полимер формирует на поверхности оксида пленку, которая вместе с парафином препятствует агрегации наноразмерных частиц. Установлено, что каталитическая активность полученных полимерсодержащих контактов в большей степени определяется способностью полимера формировать в условиях приготовления катализатора участки полисопряженных связей, а катализаторы, в полимерной матрице которых отсутствует полисопряжение, несмотря на малые размеры частиц, проявляют низкую каталитическую активность. Наличие участков полисопряжения в полимерной пленке Fe-содержащей наночастицы, по всей вероятности способствует формированию активных центров в синтезе Фишера–Тропша, поскольку железо может образовывать  $\pi$ -комплексы с сопряженными связями полимера. Из изученных полимерсодержащих образцов в большей мере формирование полисопряжения характерно для катализаторов, содержащих полиакрилонитрил, поливиниловый спирт и

сополимер стирола с дивинилбензолом, при этом поливиниловый спирт и сополимер стирола с дивинилбензолом образуют так называемые, “дефектные участки полисопряжения” и менее активны в синтезе Фишера–Тропша.

Наибольшую каталитическую активность в синтезе Фишера–Тропша проявил катализатор с добавлением полиакрилонитрила, в присутствии которого выход жидких углеводородов  $C_{5+}$  достигал  $91 \text{ г/м}^3$  при конверсии  $CO - 80\%$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант № МК-7017.2015.3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guettel R., Kuntz U., Turek T. // Chem. Eng. Technol. 2008. V. 31. № 5. P. 746.
2. Хаджиев С.Н., Сагитов С.А., Лядов А.С., Куликова М.В., Крылова А.Ю. // Нефтехимия. 2014. Т. 54. № 2. С. 88. [Petrol. Chem. 2014. V. 54. № 2. P. 88].
3. Куликова М.В., АльХазраджи А.Х., Дементьева О.С., Иванцов М.И., Флид В.Р., Хаджиев С.Н. // Нефтехимия. 2015. Т. 55. № 5. С. 391. [Petrol. Chem. 2015. V. 55. № 7. P. 537].
4. Хаджиев С.Н. // Нефтехимия. 2011. Т. 51 № 1. С. 3. [Petrol. Chem. 2011. V. 51. №1. P. 1].
5. Хасин А.А. // Рос. хим. журн. 2003. Т. 47. № 6. С. 36.
6. Iglesia E., Soled S.L., Baumgartner J.E., Reyes S.C. // J. Catal. 1995. V. 153. P. 108.
7. Park J.-Y., Lee Y.-J., Khanna P.K., Jun K.-W., Bae J.W., Kim Y.H. // J. Mol. Cat. A: Chemical. 2010. V. 323. P. 84.
8. Kulikova M.V., Ivantsov M.I., Efimov M.N., Zemtsov L.M., Chernavskii P.A., Karpacheva G.P., Khadzhiiev S.N. // Eur. Chem. Bull. 2015. V. 4. № 4. P. 181.
9. Куликова М.В., Иванцов М.И., Земцов Л.М., Чернавский П.А., Карпачева Г.П., Бондаренко Г.Н., Хаджиев С.Н. // Нефтехимия. 2015. Т. 55. № 3. С. 213. [Petrol. Chem. 2015. V. 55. № 3. P. 202].
10. Черникова Е.В., Вишневецкий Д.В., Гарина Е.С., Плуталова А.В., Литманович Е.А., Королев Б.А., Шляхтин А.В., Костина Ю.В., Бондаренко Г.Н. // Высокомолек. соед. В. 2012. Т. 54. № 3. С. 455. [Polymer Science. B. 2012. V. 54. № 3–4. P. 127].