

**КОБАЛЬТ-ЦЕОЛИТНЫЕ КАТАЛИЗАТОРЫ СИНТЕЗА ФИШЕРА–ТРОПША,
СОДЕРЖАЩИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ АЛЮМИНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ****Е.Ю. Асалиева, Л.В. Синева, В.З. Мордкович**

Екатерина Юрьевна Асалиева (ORCID 0000-0001-7531-6518)*, Лилия Вадимовна Синева (ORCID 0000-0002-6282-1547), Владимир Зальманович Мордкович (ORCID 0000-0002-9553-7657)

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7а, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: e.asalieva@tisnum.ru*, sinevalv@tisnum.ru, mordkovich@tisnum.ru

Синтез Фишера–Тропша, который сопровождается выделением существенного количества тепла, неизбежно накладывает строгие требования к тепло- и массопереносу в слое катализатора для обеспечения высокой производительности и селективности по углеводородам C_{5+} . В настоящей работе в качестве теплопроводящей добавки были использованы пудры металлического алюминия разных видов, которые вводили в состав гранулированного композитного кобальтового катализатора, содержащего цеолит. Было изучено влияние размера частиц порошка металлического алюминия на некоторые физико-химические характеристики композита, основные каталитические показатели и состав образующихся углеводородов C_{5+} . Синтезированные и исследованные катализаторы синтеза Фишера–Тропша, содержащие в качестве теплопроводящей добавки порошок металлического алюминия, отличающийся формой и размером частиц, проявляли различную каталитическую активность в реакциях образования углеводородов C_{5+} и отличались составом полученных продуктов. Установлено, что размер частиц исходного порошка теплопроводящей добавки определяет теплопроводящие свойства синтезированного композита: чем больше размер частиц исходного порошка металлического алюминия, тем выше коэффициент теплопроводности сформованного носителя. Это в свою очередь определяло производительность композита в синтезе углеводородов C_{5+} из CO и H_2 . Пористая система зависела в первую очередь от формы частиц (сфера или чешуйка) и производителя порошка алюминия. Селективность катализатора и состав продуктов синтеза, по всей видимости, зависели от способа получения и химического состава порошка алюминия в большей степени, чем от их размера. Наиболее селективным в образовании жидких углеводородов был катализатор, содержащий чешуйки металлического алюминия марки ПАП-2 производства компании РУСАЛ. Он также обладал достаточно высокой производительностью, что делает его наиболее перспективным для дальнейшего применения ввиду его стоимости и доступности на российском рынке.

Ключевые слова: синтез Фишера–Тропша, теплопроводящая добавка, металлический алюминий, синтетическая нефть

**COBALT-ZEOLITE FISCHER–TROPSCH CATALYSTS WITH DIFFERENT TYPES
OF ALUMINUM METAL POWDER****E.Yu. Asalieva, L.V. Sineva, V.Z. Mordkovich**

Ekaterina Yu. Asalieva (ORCID 0000-0001-7531-6518)*, Lilia V. Sineva (ORCID 0000-0002-6282-1547), Vladimir Z. Mordkovich (ORCID 0000-0002-9553-7657)

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

E-mail: e.asalieva@tisnum.ru*, sinevalv@tisnum.ru, mordkovich@tisnum.ru

Fischer–Tropsch synthesis, which is accompanied by the release of a significant amount of heat, inevitably imposes strict requirements on heat and mass transfer in the catalyst bed to ensure

high productivity and selectivity for C₅₊ hydrocarbons. In this work, various types of aluminum metal powder were used as a heat-conducting additive, which were introduced into the composition of granular composite cobalt-zeolite catalyst. The influence of the aluminum metal powder particle size on some physicochemical characteristics of the composite, the main catalytic parameters and the composition of the formed C₅₊ hydrocarbons was studied. Synthesized and investigated Fischer–Tropsch synthesis catalysts, containing aluminum metal powder as a heat-conducting additive, which differs in shape and particle size, exhibited different catalytic activity in the formation of C₅₊ hydrocarbons and differed in the composition of the obtained products. It has been established that the particle size of the initial powder of heat-conducting additive determines the heat-conducting properties of the synthesized composite: the larger the particle size of the initial aluminum metal powder, the higher the thermal conductivity of the formed support. This, in turn, determined the productivity of the composite in the synthesis of C₅₊ hydrocarbons from CO and H₂. The porous system depended primarily on the shape of the particles (sphere or flake) and the manufacturer of the aluminum metal powder. The selectivity of the catalyst and the composition of the synthesis products, apparently, depended on the method of preparation and the chemical composition of the aluminum powder to a greater extent than on their size. The most selective in the formation of liquid hydrocarbons was catalyst containing aluminum metal flakes PAP-2 manufactured by RUSAL. It also had rather high C₅₊ hydrocarbons productivity, which makes it the most promising for further use due to its cost and availability on the Russian market.

Key words: Fischer–Tropsch synthesis, heat-conductive additive, metallic aluminum, synthetic oil

Для цитирования:

Асалиева Е.Ю., Синева Л.В., Мордкович В.З. Кобальт-цеолитные катализаторы синтеза Фишера–Тропша, содержащие металлический алюминий различных типов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 10. С. 44–51. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.12y.

For citation:

Asalieva E.Yu., Sineva L.V., Mordkovich V.Z. Cobalt-zeolite Fischer–Tropsch catalysts with different types of aluminum metal powder. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 10. P. 44–51. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.12y.

ВВЕДЕНИЕ

Низкотемпературный синтез Фишера–Тропша – хорошо известный каталитический процесс получения смеси углеводородов из СО и Н₂ в присутствии кобальтсодержащих катализаторов, сопровождающийся выделением большого количества тепла (146–176 кДж на 1 моль СО) [1, 2]. Применяемые в промышленности катализаторы, как правило, содержат 15–30 масс. % кобальта, часто промотированного небольшим количеством благородного металла [2–4], и нанесенного пропиткой на носитель, обладающий достаточной удельной поверхностью, гидротермальной и механической стойкостью. При эксплуатации таких катализаторов важную роль играет возможность точного поддержания необходимой температуры синтеза, поскольку перегревы в слое катализатора интенсифицируют метанообразование, снижая селективность образования целевого продукта, и существенно увеличивают скорость деактивации катализатора [5–9]. Таким образом, становится очевидно, что контроль температуры синтеза может

быть обеспечен только при условии своевременного отвода тепла протекающей реакции.

В последние годы все больше современных исследователей занимаются вопросом теплопроводности катализаторов синтеза Фишера–Тропша [10–15]. Однако не стоит забывать о том, что отвод образующегося тепла может происходить посредством уноса его с продуктами реакции, если обеспечены условия для эффективного массопереноса через мезо- и макропоры пористой системы катализатора [6, 15–17]. Во время синтеза поры катализатора заполняются образующимися продуктами, что значительно замедляет скорость диффузии, особенно в том случае, если продуктами являются длинноцепочечные углеводороды (воски), что также является одним из главных факторов деактивации катализаторов синтеза Фишера–Тропша [5, 7, 18]. Известно, что углеводороды могут претерпевать различные превращения в присутствии кислотных центров, источником которых могут являться, например, цеолиты [15, 19]. Совмещение катализатора синтеза Фишера–Тропша с цеолитом в едином композитном материале привело к созда-

нию новых бифункциональных катализаторов [20, 21], обеспечивающих селективное образование смеси жидких синтетических углеводородов. Введение цеолита в состав катализатора интенсифицирует массоперенос в слое, снижая среднюю молекулярную массу образующихся углеводородов.

Таким образом, становится очевидно, что для создания высокопроизводительного и селективного катализатора важную роль играет и тепло- и массоперенос. В настоящей работе в качестве теплопроводящей добавки были использованы пудры металлического алюминия разных видов, которые вводили в состав гранулированного композитного кобальтового катализатора, содержащего цеолит. Было изучено влияние размера частиц порошка металлического алюминия на некоторые физико-химические характеристики композита, основные каталитические показатели и состав образующихся продуктов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для приготовления композитных катализаторов, на первом этапе были приготовлены носители, отличающиеся типом порошка металлического алюминия, используемого в качестве теплопроводящего компонента. Носители были приготовлены смешением цеолита H-Beta (модуль 38) (30 масс. %), теплопроводящего компонента (50 масс. %) и связующего (бемита) (20 масс. %) с жидкой фазой — смесью 9,4% азотной кислоты, триэтиленгликоля и этилового спирта с образованием гомогенной пасты. Также был приготовлен образец сравнения, не содержащий теплопроводящей добавки, количество цеолита в нем было увеличено до 80 масс. %. Пасту формовали поршневым экструдером сквозь фильеру диаметром 2,5 мм (скорость экструзии 1,6 мм/с, давление – 0,7 МПа). Полученные экструдаты сушили на воздухе, прокаливали и измельчали до гранул размером 2,5×2-

3 мм и представляли собой композитный пористый материал.

Для приготовления композитов использовали пудры металлического алюминия двух видов – сферы и чешуйки, при этом чешуйки еще различались производителем и размером. Некоторые характеристики использованных порошков металлического алюминия представлены в табл. 1. Характеристический размер d_{50} измеряли на приборе CILAS 1180 методом лазерной дифракции.

Таблица 1

Некоторые характеристики порошков металлического алюминия

Table 1. Some characteristics of aluminum metal powders

Катализатор	Марка алюминия	Поставщик	Форма частиц	d_{50} , мкм
Co-HB	—	—	—	—
Co-HB-Al ₁	АСД-6	РУСАЛ, Россия	сфера	4*
Co-HB-Al ₂	ПАП-1		чешуйка	28
Co-HB-Al ₃	ПАП-2		чешуйка	21
Co-HB-Al ₄	Type 1	TANYUN Chemical, Китай	чешуйка	25
Co-HB-Al ₅	Type 2		чешуйка	36

Примечание: *приведено значение из аналитического паспорта

Note: *the value is cited after the analytical passport

На рис. 1 приведены микрофотографии исходных порошков теплопроводящей добавки. Поскольку порошки марки ПАП-1 и ПАП-2 производителя РУСАЛ так же, как и Type 1 и Type 2 производителя TANYUN, отличались только характеристическим размером, для этих двух пар приведено по одной фотографии. Следует отметить, что наблюдаемые геометрия и размер частиц хорошо согласуются с соответствующими характеристическим размером d_{50} (табл. 1).

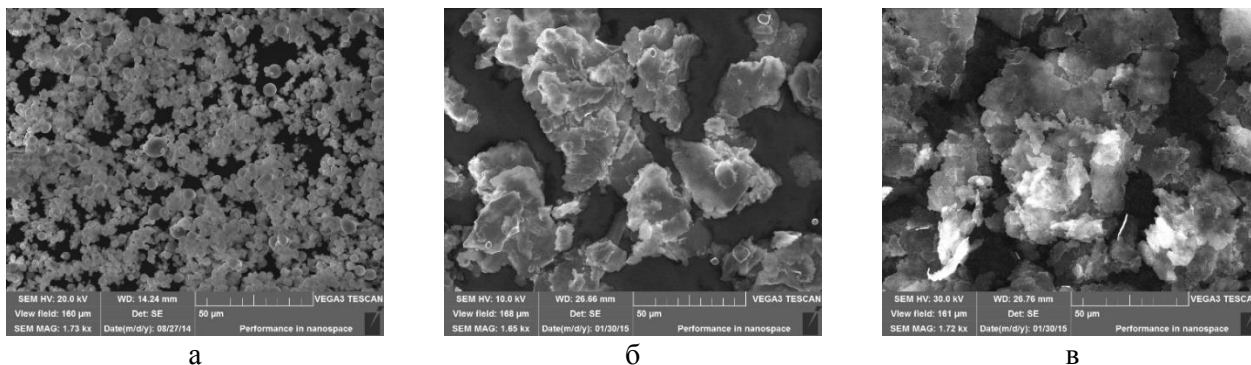


Рис. 1. Микрофотографии порошков металлического алюминия: АСД-6 (а), ПАП-1 (б) и Type 1 (в)
Fig. 1. SEM image of aluminum metal powder: ASD-6 (a), PAP-1 (б), Type 1 (в)

На втором этапе приготовления катализаторов вводили активный компонент двукратной пропиткой приготовленных носителей водным раствором нитрата кобальта. После каждой пропитки композит нагревали в токе воздуха до 250 °С и выдерживали 1 ч в этих условиях до полного разложения нитрата кобальта.

Синтез Фишера–Тропша для определения основных каталитических показателей проводили в проточном стальном реакторе (внутренний диаметр 10 мм), в который загружали 2,5 см³ катализатора. Перед началом каталитических испытаний катализатор активировали в токе водорода, подаваемого в течение 1 ч с объемной скоростью 3000 ч⁻¹ при 400 °С и 0,1 МПа. После активации катализатор разрабатывали в токе синтез-газа, содержащего 5 мол.% N₂ в качестве внутреннего стандарта (мольное отношение H₂:CO = 2, объемная скорость 1000 ч⁻¹, давление 2 МПа), при ступенчатом повышении температуры от 170 до 220 °С (на 10 °С каждые 6 ч), затем на 3–5 °С каждые 6 ч, достигая максимально возможной производительности при заданных параметрах. За производительность принимали количество жидких углеводородов в граммах, образовавшихся из пропущенного синтез-газа в расчете на 1 кг катализатора за 1 ч. Затем оптимизировали условия синтеза по температуре, повышая ее на 3–5 °С, и объемной скорости потока газа, увеличивая ее до 5000–6000 ч⁻¹ с шагом 1000 ч⁻¹ каждые 6 или 12 ч.

Исходную смесь синтез-газа и газообразные продукты синтеза анализировали с помощью газо-адсорбционной хроматографии; детектор – катарометр, газ-носитель – гелий, температурно-программируемый режим (60–200 °С). Для разделения CO и CH₄ использовали колонку с молекулярными ситами СаА, для разделения CO₂ и углеводородов C₂–C₄ – колонку NaueSep. Содержание водорода определяли по разнице с остальными компонентами.

Состав жидких углеводородов C₅₊ определяли методом газо-жидкостной хроматографии. Детектор – ПИД, газ-носитель гелий (расход газа 30 мл/мин); капиллярная колонка длиной 50 м; неподвижная фаза DB-Petro, температурно-программируемый режим (50–270 °С, скорость нагрева 4 °С/мин).

Вероятность роста углеводородной цепи рассчитывали из молекулярно-массового распределения Шульца–Флори–Андерсона по уравнению Флори:

$$Wn = (1 - \alpha)^2 n \alpha^{n-1},$$

где α – вероятность роста цепи; Wn – массовая доля

n -парафина с числом углеродных атомов n , полученная из хроматограммы.

Материальный баланс составляли после каждого изменения условий синтеза (температура или объемная скорость) в течение 25 сут., его сходимость была $\geq 98\%$.

Электронные микрофотографии морфологии и текстуры поверхности были получены на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA 3.

Структурные характеристики пористой системы носителей определяли по данным низкотемпературной адсорбции азота и гелиевой пикнометрии на приборе Quantachrome Instruments Autosorb-1C.

Коэффициент теплоемкости измеряли на дифференциальном сканирующем калориметре Perkin Elmer DSC 8000, коэффициент температуропроводности – на анализаторе NETZSCH LFA 457/2/G MicroFlash методом лазерной вспышки. Кажущуюся плотность образца определяли из его геометрических параметров и массы. Коэффициент теплопроводности (λ) рассчитывали по формуле $\lambda = \kappa \cdot C_p \cdot \rho$, где ρ – кажущаяся плотность образца, кг/м³; κ – коэффициент температуропроводности, м²/с; C_p – коэффициент теплоемкости, Дж/(кг·К).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 приведены характеристики пористой системы и коэффициент теплопроводности синтезированных носителей. Стоит отметить, что введение теплопроводящей добавки в состав композита существенно повышает его теплопроводящие свойства и зависит от размера частиц исходного порошка. Так, образец сравнения Со–НВ характеризовался коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,25$ Вт/(м·К), введение порошка алюминия в виде сфер (самые мелкие частицы) приводило к увеличению показателя до 0,84 Вт/(м·К), введение чешуек среднего размера (ПАП-2 и Туре 1) – до 4,58–4,70 Вт/(м·К) и введение самых крупных частиц (ПАП-1 и Туре 2) – до 5,21–5,50 Вт/(м·К). Таким образом, наблюдалась прямая зависимость – чем больше размер частиц исходного порошка металлического алюминия, тем выше коэффициент теплопроводности сформованного носителя.

Объем пор в большей степени зависел от типа частиц порошка теплопроводящей добавки (табл. 2). Введение алюминия в виде сфер приводило к резкому снижению показателя с 0,65 см³/г в присутствии образца сравнения Со–НВ до 0,33 см³/г, что сопровождалось снижением пористости с 0,62 до 0,49. Вероятно, это может быть объяснено формой и малым размером порошка ($d_{50} = 4$ мкм), которые приводят к образованию более плотной

структуры при смешении с другими компонентами носителя и экструзии. Введение порошка марки ПАП-1 приводило к небольшому снижению показателя до 0,61 см³/г, пористость составляла 0,60. Введение порошка алюминия остальных типов приводило к увеличению объема пор до 0,70-0,74 см³/г и пористости до 0,62-0,65.

Таблица 2

Структурные характеристики носителей
Table 2. Structural characteristics of supports

Образец	Пористость	Объем пор, см ³ /г	Средний размер пор, нм	λ , Вт/(м·К)
Co-Nb	0,62	0,65	2,7	0,25
Co-Nb-Al ₁	0,49	0,33	3,1	0,84
Co-Nb-Al ₂	0,60	0,61	3,3	5,21
Co-Nb-Al ₃	0,65	0,70	4,1	4,58
Co-Nb-Al ₄	0,62	0,72	3,4	4,70
Co-Nb-Al ₅	0,64	0,74	3,4	5,50

Средний размер пор полученных композитов увеличивался при введении теплопроводящей

добавки, достигая максимального значения 4,1 нм в присутствии образца Co-Nb-Al₃, содержащего металлический алюминий марки ПАП-2.

На рис. 2 приведены результаты каталитических испытаний приготовленных катализаторов, а именно – зависимости конверсии CO и производительности по углеводородам C₅₊ от объемной скорости. Интересно отметить, что катализатор сравнения, который не содержит теплопроводящий компонент, уже при 4000 ч⁻¹ не выдерживал нагрузки по синтез-газу, что приводило к резкому снижению конверсии CO с 73 до 32%. Катализаторы, содержащие порошок алюминия, характеризовались достаточно высокой конверсией CO (не ниже 50%) вплоть до 6000 ч⁻¹, что имеет важное значение при реализации синтеза Фишера-Тропша в промышленных масштабах. Композит Co-Nb-Al₄ отличался максимальной конверсией CO во всем диапазоне объемных скоростей (рис. 2а). Остальные композиты характеризовались близкой конверсией CO во всем диапазоне скоростей подачи синтез-газа.

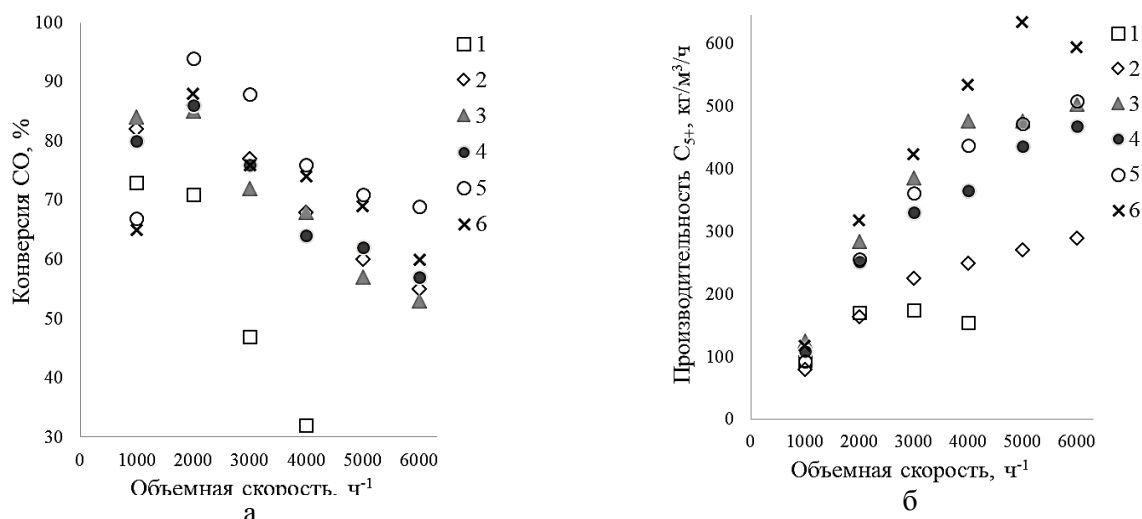


Рис. 2. Зависимость конверсии CO (а) и производительности по углеводородам C₅₊ (б) от объемной скорости для катализаторов: 1 – Co-Nb; 2 – Co-Nb-Al₁; 3 – Co-Nb-Al₂; 4 – Co-Nb-Al₃; 5 – Co-Nb-Al₄; 6 – Co-Nb-Al₅

Fig. 2. Dependence of CO conversion (a) and C₅₊ hydrocarbons productivity (б) for catalysts: 1 – Co-Nb; 2 – Co-Nb-Al₁; 3 – Co-Nb-Al₂; 4 – Co-Nb-Al₃; 5 – Co-Nb-Al₄; 6 – Co-Nb-Al₅

Производительность всех катализаторов повышалась с ростом скорости синтез-газа и при увеличении размера алюминиевых частиц в составе катализатора (и, соответственно, коэффициента теплопроводности) (рис. 2б). Композит Co-Nb-Al₅, содержащий частицы алюминия максимального размера, характеризовался наибольшей производительностью во всем диапазоне объемных скоростей.

Селективность образования углеводородов C₅₊ и метана зависела, вероятно, от суммы физико-

химических характеристик композита и типа теплопроводящей добавки (рис. 3) – в частности, можно ожидать различный химический состав для порошков алюминия производства РУСАЛ и TANYUN. Но при этом стоит отметить, что наиболее селективным в образовании целевого продукта и наименее селективным в образовании главного побочного продукта – метана – оказался катализатор Co-Nb-Al₃, содержащий чешуйки алюминия марки ПАП-2.

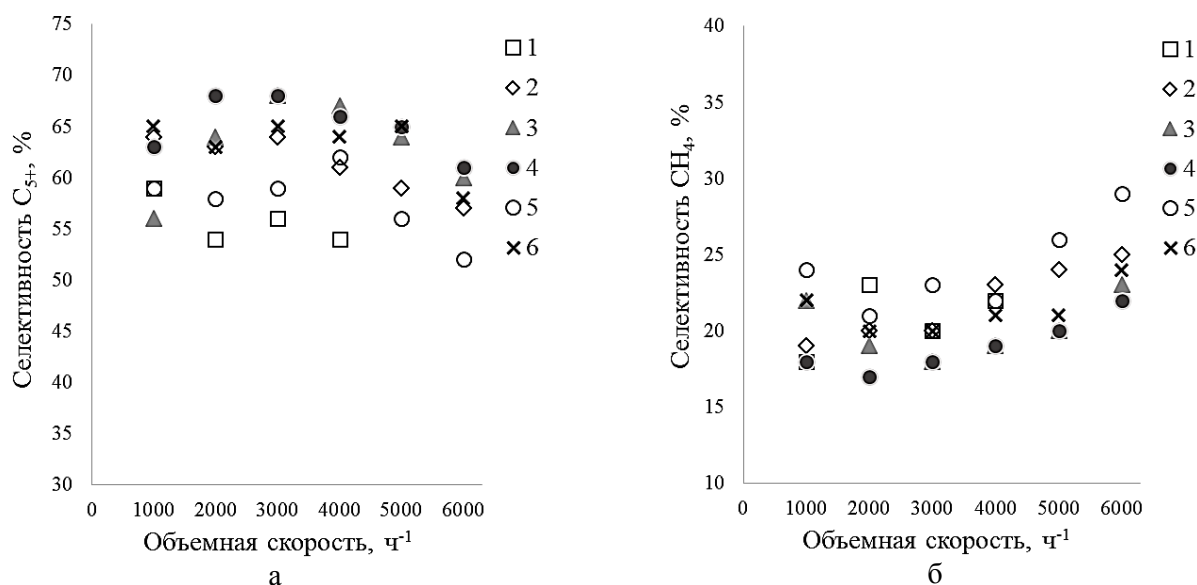


Рис. 3. Зависимость селективности образования углеводородов C_{5+} (а) и метана (б) от объемной скорости для катализаторов: 1 – Co–Nb; 2 – Co–Nb–Al₁; 3 – Co–Nb–Al₂; 4 – Co–Nb–Al₃; 5 – Co–Nb–Al₄; 6 – Co–Nb–Al₅
 Fig. 3. Dependence of the selectivity of the formation of C_{5+} hydrocarbons (а) and methane selectivity (б) on volumetric velocity for catalysts: 1 – Co–Nb; 2 – Co–Nb–Al₁; 3 – Co–Nb–Al₂; 4 – Co–Nb–Al₃; 5 – Co–Nb–Al₄; 6 – Co–Nb–Al₅

Таблица 3

Состав образующихся углеводородов C_{5+}
 Table 3. Composition of FTS products

Образец	Групповой состав, масс.%			Фракционный состав, масс.%			α
	Н-парафины	Изопарафины	Олефины	C_5-C_{10}	$C_{11}-C_{18}$	C_{19+}	
1000 ч ⁻¹							
Co–Nb	45	32	23	69	29	2	0,77
Co–Nb–Al ₁	55	29	16	70	28	2	0,71
Co–Nb–Al ₂	58	32	10	64	31	5	0,78
Co–Nb–Al ₃	60	28	12	68	30	2	0,75
Co–Nb–Al ₄	78	16	6	50	42	8	0,80
Co–Nb–Al ₅	80	13	7	54	39	7	0,82
3000 ч ⁻¹							
Co–Nb	32	39	29	79	20	1	0,74
Co–Nb–Al ₁	39	30	31	77	22	1	0,72
Co–Nb–Al ₂	40	27	33	75	23	2	0,73
Co–Nb–Al ₃	38	30	32	79	21	0	0,69
Co–Nb–Al ₄	43	28	29	85	14	1	0,67
Co–Nb–Al ₅	45	27	28	76	22	2	0,75
6000 ч ⁻¹							
Co–Nb	—	—	—	—	—	—	—
Co–Nb–Al ₁	38	24	38	81	19	0	0,70
Co–Nb–Al ₂	34	26	40	79	20	1	0,72
Co–Nb–Al ₃	36	24	40	78	22	0	0,70
Co–Nb–Al ₄	35	25	40	82	18	0	0,68
Co–Nb–Al ₅	37	23	40	76	23	1	0,72

В табл. 3 приведены данные по составу образующихся углеводородов C_{5+} , полученных в присутствии исследованных катализаторов. Очевидно, что размер частиц порошка металлического алюминия в составе катализатора не оказывает значи-

тельного влияния на групповой и фракционный составы углеводородов C_{5+} , которые определялись преимущественно химическим составом теплопроводящей добавки. Так, практически во всем диапазоне условий синтеза углеводороды C_{5+} , получен-

ные в присутствии катализаторов на основе чешуек алюминия одного производителя, практически не отличались по своему составу. В гораздо большей степени состав полученных продуктов зависел от объемной скорости подачи синтез-газа, то есть от времени контакта. Все полученные образцы углеводородов C_{5+} могут быть охарактеризованы как жидкая синтетическая нефть, содержащая значительное количество олефинов и изопарафинов.

ВЫВОДЫ

Исследованные катализаторы синтеза Фишера–Тропша, содержащие в качестве теплопроводящей добавки порошок металлического алюминия, отличающийся формой и размером частиц, проявляли различную каталитическую активность в реакциях образования углеводородов C_{5+} и отличались составом полученных продуктов. Установлено, что размер частиц исходного порошка теплопроводящей добавки определяет теплопроводящие свойства синтезированного композита: чем больше размер частиц исходного порошка металлического алюминия, тем выше коэффициент теплопроводности сформованного носителя. Это в свою очередь определяло производительность композита в синтезе углеводородов C_{5+} из СО и H_2 . Пористая система зависела в первую очередь от формы частиц (сфера или чешуйка) и производителя порошка алюминия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Steynberg A.P., Dry M.E.** Fischer–Tropsch technology. Elsevier Science & Technology. 2004. 722 p. DOI: 10.1016/S0167-2991(04)80459-2.
2. **Asalievа E., Sineva L., Sinichkina S., Solomonik I., Gryaznov K., Pushina E., Kulchakovskaya E., Kulnitskiy B., Ovsyannikov D., Mordkovich V.** // *Appl. Catal. A: Gen.* 2020. V. 601. P. 117639. DOI: 10.1016/j.apcata.2020.117639.
3. **de Klerk A., Furimsky E.** Catalysis in the refining of Fischer–Tropsch syncrude. Cambridge, UK: RSC Publ. 2010. 279 p. DOI: 10.1039/9781849732017.
4. **Maitlis P.M., de Klerk A.** Greener Fischer–Tropsch processes for fuels and feedstock. Weinheim, Germany: Wiley–VCH. 2013. 372 p. DOI: 10.1002/9783527656837.
5. **Горшков А.С., Синева Л.В., Грязнов К.О., Асалиева Е.Ю., Мордкович В.З.** // *Катализ в пром-сти.* 2022. Т. 22. № 6. С. 16–29. DOI: 10.18412/1816-0387-2022-6-16-29.
6. **Fratolocchi L., Visconti C.G., Groppi G., Lietti L., Tronconi E.** // *Chem. Eng. J.* 2018. V. 349. P. 829–837. DOI: 10.1016/j.cej.2018.05.108.
7. **Röblier S., Kern C., Jess A.** // *Catal. Sci. Technol.* 2019. V. 9. P. 4047–4054. DOI: 10.1039/c9cy00671k.
8. **Merino D., Sanz O., Montes M.** // *Chem. Eng. J.* 2017. V. 327. P. 1033–1042. DOI: 10.1016/j.cej.2017.07.003.

Селективность катализатора и состав продуктов синтеза, по всей видимости, зависели от способа получения и химического состава порошка алюминия в большей степени, чем от их размера. Наиболее селективным в образовании жидких углеводородов был катализатор, содержащий чешуйки металлического алюминия марки ПАП-2 производства компании РУСАЛ. Он также обладал достаточно высокой производительностью, что делает его наиболее перспективным для дальнейшего применения ввиду его стоимости и доступности на российском рынке.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Экспериментальная работа выполнена при инструментальной поддержке Центра коллективного пользования "Исследования наноструктурных, углеродных и сверхтвердых материалов" ФГБНУ ТИСНУМ.

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

The work was performed using the Shared Research Facilities 'Research of Nanostructured, Carbon and Superhard Materials' FSBI TISNCM. The authors declare no conflict of interest warranting disclosure in this article.

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

REFERENCES

1. **Steynberg A.P., Dry M.E.** Fischer–Tropsch technology. Elsevier Science & Technology. 2004. 722 p. DOI: 10.1016/S0167-2991(04)80459-2.
2. **Asalievа E., Sineva L., Sinichkina S., Solomonik I., Gryaznov K., Pushina E., Kulchakovskaya E., Kulnitskiy B., Ovsyannikov D., Mordkovich V.** // *Appl. Catal. A: Gen.* 2020. V. 601. P. 117639. DOI: 10.1016/j.apcata.2020.117639.
3. **de Klerk A., Furimsky E.** Catalysis in the refining of Fischer–Tropsch syncrude. Cambridge, UK: RSC Publ. 2010. 279 p. DOI: 10.1039/9781849732017.
4. **Maitlis P.M., de Klerk A.** Greener Fischer–Tropsch processes for fuels and feedstock. Weinheim, Germany: Wiley–VCH. 2013. 372 p. DOI: 10.1002/9783527656837.
5. **Gorshkov A.S., Sineva L. V., Gryaznov K.O., Asalievа E.Yu., Mordkovich V.Z.** // *Catal. Ind.* 2023. V. 15. N 2. P. 152–164. DOI: 10.1134/S207005042302006X.
6. **Fratolocchi L., Visconti C.G., Groppi G., Lietti L., Tronconi E.** // *Chem. Eng. J.* 2018. V. 349. P. 829–837. DOI: 10.1016/j.cej.2018.05.108.
7. **Röblier S., Kern C., Jess A.** // *Catal. Sci. Technol.* 2019. V. 9. P. 4047–4054. DOI: 10.1039/c9cy00671k.
8. **Merino D., Sanz O., Montes M.** // *Chem. Eng. J.* 2017. V. 327. P. 1033–1042. DOI: 10.1016/j.cej.2017.07.003.

9. Горшков А.С., Синева Л.В., Грязнов К.О., Митберг Э.Б., Мордкович В.З. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 11. С. 65–70. DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.2y.
10. Соломоник И.Г., Грязнов К.О., Митберг Э.Б., Мордкович В.З. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 71–76. DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.11y.
11. Holmen A., Venvik H.J., Myrstad R., Zhu J., Chen D. // *Catal. Today*. 2013. V. 216. P. 150–157. DOI: 10.1016/j.cattod.2013.06.006.
12. Sheng M., Yang H., Cahela D.R., Yantz Jr. W.R., Gonzalez C.F., Tatarchuk B.J. // *Appl. Catal. A: Gen.* 2012. V. 445–446. P. 143–152. DOI: 10.1016/j.apcata.2012.08.012.
13. Visconti C.G., Tronconi E., Groppi G., Lietti L., Iovane M., Rossini S., Zennaro R. // *Chem. Eng. J.* 2011. V. 171. P. 1294–1307. DOI: 10.1016/j.cej.2011.05.014.
14. Lacroix M., Dreibine L., de Tymowski B., Vigneron F., Edouard D., Bégin D., Nguyen P., Pham C., Savin-Poncet S., Luck F., Ledoux M.-J., Pham-Huu C. // *Appl. Catal. A: Gen.* 2011. V. 397. P. 62–72. DOI: 10.1016/j.apcata.2011.02.012.
15. Asalieva E., Gryaznov K., Kulchakovskaya E., Ermolaev I., Sineva L., Mordkovich V. // *Appl. Catal. A: Gen.* 2015. V. 505. P. 260–266. DOI: 10.1016/j.apcata.2015.08.006.
16. Kim J., Nese V., Joos J., Jeske K., Duyckaerts N., Pfänder N., Prieto G. // *J. Mater. Chem. A*. 2018. V. 6. P. 21978–21989. DOI: 10.1039/c8ta07512c.
17. Yang X.Y., Chen L.H., Li Y., Rooke J.C., Sanchez C., Su B.L. // *Chem. Soc. Rev.* 2017. V. 46. P. 481–558. DOI: 10.1039/C6CS00829A.
18. Савостьянов А.П., Яковенко Р.Е., Нарочный Г.Б., Зубков И.Н., Сулима С.И., Соромотин В.Н., Митченко С.А. // *Нефтехимия*. 2020. Т. 60. № 1. С. 89–100. DOI: 10.31857/S0028242120010128.
19. Cejka J., Corma A., Zones S. Zeolites and catalysis. Synthesis, reactions and applications. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. 2010. 881 p. DOI: 10.1002/9783527630295.
20. Sartipi S., van Dijk J.E., Gascon J., Kapteijn F. // *Appl. Catal. A: Gen.* 2013. V. 456. P. 11–22. DOI: 10.1016/j.apcata.2013.02.012.
21. Синева Л.В., Асалиева Е.Ю., Мордкович В.З. // *Усп. химии*. 2015. Т. 84. № 11. С. 1176–1189.
9. Gorshkov A.S., Sineva L.V., Gryaznov K.O., Mitberg E.B., Mordkovich V.Z. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 11. P. 65–70 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226511.2y.
10. Solomonik I.G., Gryaznov K.O., Mitberg E.B., Mordkovich V.Z. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 12. P. 71–76 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206312.11y.
11. Holmen A., Venvik H.J., Myrstad R., Zhu J., Chen D. // *Catal. Today*. 2013. V. 216. P. 150–157. DOI: 10.1016/j.cattod.2013.06.006.
12. Sheng M., Yang H., Cahela D.R., Yantz Jr. W.R., Gonzalez C.F., Tatarchuk B.J. // *Appl. Catal. A: Gen.* 2012. V. 445–446. P. 143–152. DOI: 10.1016/j.apcata.2012.08.012.
13. Visconti C.G., Tronconi E., Groppi G., Lietti L., Iovane M., Rossini S., Zennaro R. // *Chem. Eng. J.* 2011. V. 171. P. 1294–1307. DOI: 10.1016/j.cej.2011.05.014.
14. Lacroix M., Dreibine L., de Tymowski B., Vigneron F., Edouard D., Bégin D., Nguyen P., Pham C., Savin-Poncet S., Luck F., Ledoux M.-J., Pham-Huu C. // *Appl. Catal. A: Gen.* 2011. V. 397. P. 62–72. DOI: 10.1016/j.apcata.2011.02.012.
15. Asalieva E., Gryaznov K., Kulchakovskaya E., Ermolaev I., Sineva L., Mordkovich V. // *Appl. Catal. A: Gen.* 2015. V. 505. P. 260–266. DOI: 10.1016/j.apcata.2015.08.006.
16. Kim J., Nese V., Joos J., Jeske K., Duyckaerts N., Pfänder N., Prieto G. // *J. Mater. Chem. A*. 2018. V. 6. P. 21978–21989. DOI: 10.1039/c8ta07512c.
17. Yang X.Y., Chen L.H., Li Y., Rooke J.C., Sanchez C., Su B.L. // *Chem. Soc. Rev.* 2017. V. 46. P. 481–558. DOI: 10.1039/C6CS00829A.
18. Savost'yanov A.P., Yakovenko R.E., Narochnyi G.B., Zubkov I.N., Sulima S.I., Soromotin V.N., Mitchenko S.A. // *Petrol. Chem.* 2020. V. 60. P. 81–91. DOI: 10.1134/S0965544120010120.
19. Cejka J., Corma A., Zones S. Zeolites and catalysis. Synthesis, reactions and applications. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. 2010. 881 p. DOI: 10.1002/9783527630295.
20. Sartipi S., van Dijk J.E., Gascon J., Kapteijn F. // *Appl. Catal. A: Gen.* 2013. V. 456. P. 11–22. DOI: 10.1016/j.apcata.2013.02.012.
21. Sineva L.V., Asalieva E.Yu., Mordkovich V.Z. // *Usp. Khim.* 2015. V. 84. N 11. P. 1176–1189 (in Russian). DOI: 10.1070/RCR4464.

Поступила в редакцию 14.06.2023

Принята к опубликованию 10.07.2023

Received 14.06.2023

Accepted 10.07.2023