

Научная статья

УДК 542.8:544.14:544.16:544.47:544.344

DOI: 10.15372/KhUR2025642

EDN: OGTKII

Превращение легких алканов C_2-C_4 в олефиновые углеводороды на цеолитсодержащих катализаторах

Л. Н. ВОСМЕРИКОВА , А. А. ВОСМЕРИКОВ, Я. Е. БАРБАШИН, А. В. ВОСМЕРИКОВ

Институт химии нефти СО РАН, Томск, Россия

E-mail: lkplu@ipc.tsc.ru , antonvosmerikov@gmail.com, dmpps@ipc.tsc.ru, pika@ipc.tsc.ru

Аннотация

Приведены результаты исследований по превращению различного по составу газообразного углеводородного сырья в олефиновые углеводороды на цеолитсодержащих катализаторах. Результаты испытания катализаторов свидетельствуют о том, что модифицированные фосфором и марганцем цеолиты проявляют высокую активность в процессе превращения низших алканов C_2-C_4 в олефиновые углеводороды. Установлено, что наибольшей дегидрирующей активностью обладает P-содержащий цеолитный катализатор, а Mn-содержащий цеолитный катализатор характеризуется более высокой общей активностью. Показано, что значительное превращение сырья наблюдается в температурном интервале 600–650 °С в зависимости от длины углеводородной цепи молекулы исходного алкана. Для P-содержащего цеолитного катализатора наблюдается практически линейная зависимость выхода олефиновых углеводородов от конверсии исходных C_2-C_4 -углеводородов. В то же время для Mn-содержащего цеолита зависимость выхода олефинов от конверсии определяется типом исходного алкана. Методами термопрограммированной десорбции аммиака и низкотемпературной адсорбции азота исследованы кислотные и текстурные характеристики исходного цеолита и его модифицированных образцов и установлены их отличительные особенности, влияющие на свойства катализаторов в процессе превращения алканов C_2-C_4 в олефиновые углеводороды.

Ключевые слова: этан, пропан, *n*-бутан, олефиновые углеводороды, активность, селективность, кислотность

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ИХН СО РАН (НИОКТР № 121031200182-5).

Для цитирования: Восмерикова Л. Н., Восмериков А. А., Барбашин Я. Е., Восмериков А. В. Превращение легких алканов C_2-C_4 в олефиновые углеводороды на цеолитсодержащих катализаторах // Химия в интересах устойчивого развития. 2025. Т. 33, № 2. С. 191–198. DOI: 10.15372/KhUR2025642. EDN: OGTKII.

Conversion of light alkanes C_2-C_4 into olefin hydrocarbons over zeolite-containing catalysts

L. N. VOSMERIKOVA , A. A. VOSMERIKOV, YA. E. BARBASHIN, A. V. VOSMERIKOV

Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

E-mail: lkplu@ipc.tsc.ru[✉], antonvosmerikov@gmail.com, dmpps@ipc.tsc.ru, pika@ipc.tsc.ru

Abstract

Results of studies on the conversion of gaseous hydrocarbon feedstock with different compositions into olefin hydrocarbons over zeolite-containing catalysts are presented. The results of catalyst testing indicate that zeolites modified with phosphorus and manganese exhibit high activity in the conversion of lower C_2-C_4 alkanes into olefin hydrocarbons. It has been determined that the P-containing zeolite catalyst has the highest dehydrogenating activity, and the Mn-containing zeolite catalyst is characterized by a higher overall activity. It is shown that significant conversion of the feedstock is observed within the temperature range of 600–650 °C, depending on the hydrocarbon chain length of the initial alkane molecule. For the P-containing zeolite catalyst, almost linear dependence of the yield of olefin hydrocarbons on the conversion of the initial C_2-C_4 -hydrocarbons is observed. At the same time, for the Mn-containing zeolite, the dependence of the yield of olefin hydrocarbons on conversion is determined by the type of initial hydrocarbon feedstock. The acid and textural characteristics of the original zeolite and its modified samples were studied by temperature-programmed desorption of ammonia and low-temperature adsorption of nitrogen, and their distinctive features affecting the properties of the catalysts in the conversion of C_2-C_4 alkanes into olefin hydrocarbons were established.

Keywords: ethane, propane, *n*-butane, olefinic hydrocarbons, activity, selectivity, acidity

ВВЕДЕНИЕ

Задача рационального использования компонентов природного и попутного нефтяного газов, а также отходящих газов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств, стимулирует поиск новых катализаторов, способных с высокой селективностью превращать содержащиеся в этих газах углеводороды в практические важные продукты. Легкие олефины, такие как этилен, пропилен и бутилены, представляют интерес для нефтехимической промышленности в качестве сырья в производстве большого спектра химических продуктов, включая полимеры, оксигенаты и важные промежуточные соединения (этиленоксид, пропиленоксид, этиленгликоль, ацетон, ацетальдегид и т. д.) и многое другое [1, 2]. В связи с неуклонным ростом урбанизации спрос на легкие олефины постоян-

но увеличивается [3–5]. Традиционными промышленными технологиями получения легких олефинов являются процессы термического пиролиза, парового или пароводородного термического пиролиза [6–11], каталитического пиролиза [12], пиролиза в присутствии иницирующих добавок [13], каталитического крекинга [14–16], проводимых при повышенных температурах.

На сегодняшний день объем производства олефинов посредством парового крекинга и жидкостного каталитического крекинга недостаточен для удовлетворения растущего рынка. В связи с этим в мировой практике широко используются альтернативные технологии их получения, в частности, дегидрирование алканов C_2-C_5 , а также производство из метанола (процесс МТО (methanol to olefins)/МТП (methanol to propylene)), из угля (СТО (coal to olefins)) или из биомассы (ВМТП (biomass to olefins via meth-

anol-to-propylene pathway)). Процесс дегидрирования легких алканов в олефины привлекает все большее внимание исследователей как экономически эффективный промышленный способ их получения [17, 18]. Следует отметить, что среди известных катализаторов конверсии легких алканов в олефины цеолитсодержащие катализаторы рассматриваются как перспективные системы для данного процесса.

Цель данной работы – исследование физико-химических свойств цеолитных катализаторов, содержащих добавки марганца и фосфора, а также изучение их эффективности в процессах превращения различного по составу газообразного углеводородного сырья в олефиновые углеводороды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения исследований в условиях гидротермального синтеза был получен высококремнеземный цеолит (ВКЦ) с силикатным модулем 100, и на его основе методом пропитки приготовлены образцы, содержащие марганец (Mn-ВКЦ) и фосфор (P-ВКЦ). В качестве источника марганца использовали гексагидрат нитрата марганца ($Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$), а источником фосфора служил водный раствор гидрофосфата аммония ($(NH_4)_2HPO_4$). На основании ранее полученных нами результатов по установлению оптимального содержания марганца и фосфора (в пересчете на элемент) в катализаторе, были приготовлены образцы цеолита с добавкой 8.0 мас. % Mn и 4.0 мас. % P [19, 20].

В качестве исходного сырья использовали: этан (степень чистоты 99.97 об. %), пропан (степень чистоты 99.95 об. %) и *n*-бутан (степень чистоты 99.20 об. %). Каталитические испытания проводили на установке проточного типа с неподвижным слоем катализатора ($V = 3 \text{ см}^3$) при температуре реакции 500–650 °С, объемной скорости подачи сырья 500 ч^{-1} и атмосферном давлении. Показатели каталитической активности образцов рассчитывали на основе данных газохроматографического анализа образующихся продуктов, полученных с использованием хроматографа “Хроматэк-Кристалл 5000.2” (Хроматэк, Россия). Продолжительность опыта при одних и тех же условиях процесса составляла 60 мин, активность катализатора в течение этого времени оставалась постоянной. Для оценки каталитической активности образцов определяли степень превращения исходного углево-

дорода, а также рассчитывали выход и селективность образования продуктов реакции.

Удельную поверхность и параметры пористой структуры исходного и модифицированных цеолитов определяли методом низкотемпературной адсорбции азота с помощью автоматического газоадсорбционного анализатора Sorbtometer-M (ООО “КАТАКОН”, Россия). Расчет удельной поверхности исследуемых образцов проводили с использованием многоточечного метода Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ). Объем и размер пор катализатора рассчитывали с использованием модели ВЈН (Barett–Joyner–Halenda) из данных изотерм адсорбции и десорбции при относительном давлении $P/P_0 = 0.99$.

Тестирование кислотных свойств поверхности катализаторов проводили методом температурно-программированной десорбции (ТПД) аммиака, позволяющим определить как количество кислотных центров, так и распределение их по силе. Аммиак адсорбировали при 100 °С на образец после предварительной тренировки. Десорбцию аммиака с поверхности цеолитного катализатора осуществляли в режиме линейного нагрева со скоростью 10 °С/мин. Концентрация кислотных центров соответствует количеству десорбированного аммиака, а их сила – температурным максимумам на десорбционных кривых.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований по превращению этана и пропана на исходном немодифицированном цеолите (Н-ВКЦ) и катализаторах Mn-ВКЦ и P-ВКЦ приведены в табл. 1. Немодифицированный цеолит проявляет низкую активность при превращении этана и пропана в олефиновые углеводороды. Так, выход образующихся на нем олефиновых углеводородов при 650 °С составляет всего 5.0 % при конверсии этана 20 %. Выход олефиновых углеводородов при превращении пропана при этой же температуре составляет 12.8 %, а выход ароматических углеводородов – 33.2 % (селективность их образования – 34.9 %), т. е. исходный цеолит обладает достаточно высокой ароматизирующей активностью. Основными продуктами в составе ароматических углеводородов являются бензол, толуол и ксилолы, в небольших количествах присутствуют алкилбензолы C_{9+} , нафталин и алкилнафталины. На образце Mn-ВКЦ заметное превращение этана начинается при темпе-

ТАБЛИЦА 1

Показатели процесса превращения различного углеводородного сырья на цеолитсодержащих катализаторах

Катализатор	Исходное сырье	T, °C	X, %	Y, %	Селективность образования продуктов, мас. %						
					H ₂	Метан + этан	Этилен	Пропилен	Бутены	Алканы C ₃ -C ₅	Арены
Н-ВКЦ	Этан	550	6	2.6	4.9	31.9	35.9	9.6	0	3.2	14.5
		600	10	3.9	8.3	34.2	30.2	8.5	0	2.8	16.0
		650	20	5.0	9.1	36.0	20.6	4.1	0	1.0	29.2
	Пропан	500	26	6.3	1.0	51.8	8.7	10.7	4.5	19.9	3.4
		550	51	13.6	1.8	61.5	12.0	10.8	3.7	5.2	5.1
		600	86	14.9	2.0	47.1	10.4	5.7	1.4	0.5	33.0
		650	95	12.8	3.0	48.6	9.9	3.1	0.4	0.1	34.9
Mn-ВКЦ	Этан	550	8	4.9	7.7	11.0	49.0	9.9	2.0	10.1	10.3
		600	18	9.3	8.5	26.0	44.8	5.6	1.1	3.4	10.6
		650	47	11.9	5.1	47.6	23.0	1.8	0.5	0.7	21.3
	Пропан	500	11	4.8	2.2	39.2	18.2	18.6	6.5	10.9	4.3
		550	26	9.6	3.9	47.7	18.0	15.0	3.9	2.9	8.6
		600	49	14.6	4.1	53.4	15.3	12.6	1.7	0.5	12.4
		650	65	21.2	3.1	53.2	18.8	12.6	0.9	0.1	11.3
P-ВКЦ	Этан	550	1	0.2	0.1	0.9	16.0	0.6	0	73.5	8.9
		600	2	2.1	5.2	1.4	87.2	0.7	0	3.4	2.1
		650	14	12.5	5.6	2.7	89.0	1.1	0	0.9	0.7
	Пропан	500	1	0.4	1.5	34.0	24.9	31.0	0	8.6	0
		550	6	4.0	1.6	22.3	29.5	42.0	0.9	1.0	2.7
		600	24	17.3	1.8	25.3	30.0	40.2	1.5	0.2	1.0
		650	46	31.9	1.6	27.5	32.5	35.1	2.2	0.1	1.0

Примечание. T – температура процесса; X – конверсия; Y – выход олефинов.

ратуре реакции 600 °C. При повышении температуры конверсия исходного сырья и выход низших олефинов растет, и при 650 °C их значения достигают 47 и 11.9 % соответственно. Селективность образования олефиновых углеводородов при 650 °C составляет 25.3 %, из которых 23.0 % приходится на этилен, 1.8 % – на пропилен и 0.5 % – на бутены. Селективность образования ароматических углеводородов на образце Mn-ВКЦ снижается по сравнению с исходным цеолитом и при 650 °C составляет 21.3 %. На P-содержащем цеолитном катализаторе степень превращения этана невысокая и при 650 °C составляет всего 14 %, что на 33 % ниже, чем на образце Mn-ВКЦ при этих же условиях проведения процесса. В то же время селективность образования этилена (целевого продукта) в процессе превращения этана на катализаторе P-ВКЦ значительно выше, чем на образце Mn-ВКЦ. Так, при температуре реакции 650 °C селективность его образования на катализаторе P-ВКЦ достигает 89.0 %.

Таким образом, с увеличением температуры процесса превращения этана на катализаторе Mn-ВКЦ наблюдается увеличение образования побочных продуктов, что свидетельствует о

преимущественном протекании реакций крекинга. На образце P-ВКЦ, напротив, при более высоких температурах значительно увеличивается селективность образования олефиновых углеводородов, т. е. улучшается дегидрирующая способность катализатора.

Пропан подвергается каталитическому превращению легче, чем этан. Так, конверсия пропана на образце Mn-ВКЦ при 600 °C составляет 49 %, в то время как при этих же условиях конверсия этана на нем была всего 18 %. С ростом температуры процесса выход олефиновых углеводородов увеличивается и при 650 °C достигает 21.2 %. В процессе превращения пропана на катализаторе Mn-ВКЦ образуется меньшее количество ароматических углеводородов, чем при превращении этана. При использовании катализатора P-ВКЦ наблюдается несколько иная картина. С ростом температуры процесса конверсия пропана повышается медленнее, чем на образце Mn-ВКЦ, достигая максимального значения 46 % при 650 °C, что указывает на более низкую его общую активность, оцениваемую по степени превращения исходного сырья. В то же время на образце P-ВКЦ образуется больше олефинов при высоких температурах и их вы-

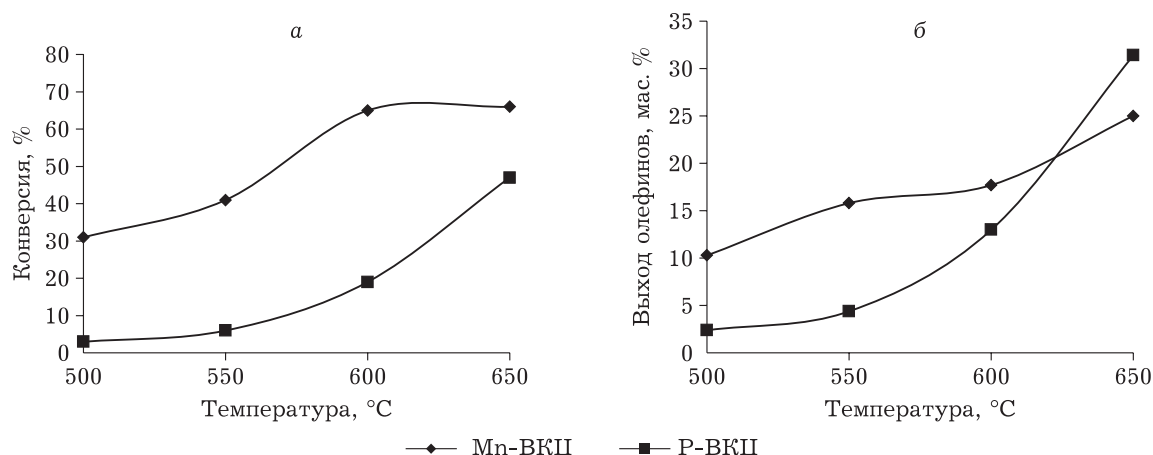


Рис. 1. Зависимость конверсии (а) и выхода олефиновых углеводородов (б) от температуры процесса превращения *n*-бутана на цеолитных катализаторах, содержащих марганец (Mn-ВКЦ) и фосфор (P-ВКЦ).

ход достигает 31.9 % при 650 °C, что свидетельствует о том, что при температуре выше 600 °C этот катализатор более эффективен при превращении пропана в олефины. Селективность образования этилена и пропилена на образце P-ВКЦ при 650 °C очень близка и составляет соответственно 32.5 и 35.1 %.

На рис. 1 представлены данные по изменению конверсии *n*-бутана и выхода низших олефинов, образующихся на исследуемых катализаторах, в зависимости от температуры проведения процесса. Видно, что для обоих катализаторов характерно увеличение конверсии и выхода олефиновых углеводородов с ростом температуры процесса. Для образца Mn-ВКЦ наблюдается резкое увеличение конверсии *n*-бутана с ростом температуры процесса от 500 до 600 °C, а при дальнейшем повышении температуры конверсия практически не меняется (см. рис. 1, а). Катализатор P-ВКЦ характеризуется меньшей активностью по сравнению с образцом Mn-ВКЦ в исследованном диапазоне температур. С ростом температуры процесса наблюдается постепенное повышение конверсии *n*-бутана, и при температуре 650 °C она составляет 47 %, что на 19 % ниже, чем для образца Mn-ВКЦ.

С повышением температуры процесса от 500 до 650 °C происходит плавное увеличение выхода олефиновых углеводородов, образующихся на образце Mn-ВКЦ (см. рис. 1, б). Кроме того, на данном образце выход олефинов в интервале температур от 500 до 600 °C заметно превышает этот показатель на катализаторе P-ВКЦ. Однако ситуация меняется при повышении температуры процесса до 650 °C, и выход олефиновых углеводородов на катализаторе P-ВКЦ

становится выше по сравнению с выходом олефинов на Mn-ВКЦ.

Обнаруженные отличия в поведении катализаторов при превращении *n*-бутана обусловлены различными функциональными особенностями их активных центров, формирующихся при введении марганца и фосфора в цеолит.

С помощью метода ТПД аммиака было установлено распределение кислотных центров по силе и определена их концентрация. В зависимости от температурного диапазона десорбции аммиака кислотные центры были отнесены: к слабым – в интервале 100–300 °C и к сильным – в интервале 300–600 °C. Среди исследуемых катализаторов немодифицированный цеолит (образец H-ВКЦ) обладает самой высокой концентрацией кислотных центров обоих типов (табл. 2). Концентрация слабых и сильных кислотных центров для данного образца составляет соответственно 515 и 236 мкмоль/г. Для P-ВКЦ наблюдается сглаживание высокотемпературного

ТАБЛИЦА 2

Кислотные характеристики цеолитсодержащих катализаторов

Катализатор	Температура, °C		Концентрация, мкмоль/г		
	T_I	T_{II}	C_I	C_{II}	C_{Σ}
H-ВКЦ	200	450	515	236	751
Mn-ВКЦ	160	405	395	126	521
P-ВКЦ	180	Пик сглажен	326	89	415

Примечание. T_I , T_{II} – температуры максимумов низко- и высокотемпературных пиков на кривых термопрограммируемой десорбции аммиака; C_I , C_{II} и C_{Σ} – концентрации слабых и сильных кислотных центров и их сумма соответственно.

ТАБЛИЦА 3

Текстурные характеристики цеолитсодержащих катализаторов

Катализатор	$S_{\text{БЭТ}}, \text{ м}^2/\text{г}$	$S_{\text{мезо}}, \text{ м}^2/\text{г}$	$S_{\text{микро}}, \text{ м}^2/\text{г}$	$V_{\text{общ}}, \text{ см}^3/\text{г}$	$V_{\text{мезо}}, \text{ см}^3/\text{г}$	$V_{\text{микро}}, \text{ см}^3/\text{г}$	$D, \text{ нм}$
Н-ВКЦ	314	104	210	0.15	0.04	0.11	1.9
Мп-ВКЦ	298	141	157	0.14	0.07	0.07	1.8
Р-ВКЦ	172	70	102	0.09	0.04	0.05	2.0

Примечание. $S_{\text{БЭТ}}$ – удельная поверхность цеолита, измеренная по методу БЭТ; $S_{\text{мезо}}, S_{\text{микро}}$ – удельная поверхность мезо- и микропор; $V_{\text{общ}}$ – общий удельный объем пор; $V_{\text{мезо}}, V_{\text{микро}}$ – удельный объем мезо- и микропор; D – средний диаметр пор.

пика, поэтому точное определение его максимума не представляется возможным. Кроме того, катализатор Р-ВКЦ содержит наименьшее количество слабых и сильных кислотных центров, их суммарная концентрация составляет 415 мкмоль/г. Снижение кислотности Р-содержащего цеолита обусловлено взаимодействием фосфора с кислородом мостиковых ОН-групп, приводящее к разрыву связи Al–O и раскрытию каркаса цеолита. Следствием этого является изменение каталитической активности и селективности образца Р-ВКЦ в отношении образования олефиновых углеводородов. Катализатор Мп-ВКЦ содержит большее количество слабых кислотных центров, имеющих меньшую силу, по сравнению с образцом Р-ВКЦ. Это объясняется тем, что при добавлении к цеолиту 8.0 мас. % Мп достигается предельная его концентрация, при которой происходит закрепление ионов Mn^{2+} на сильных кислотных центрах цеолитного носителя.

Другими важнейшими характеристиками цеолитных катализаторов являются их текстурные свойства, отвечающие за молекулярно-ситовой эффект. Исходный цеолит характеризуется

наибольшей удельной поверхностью (314 $\text{м}^2/\text{г}$), при этом 210 $\text{м}^2/\text{г}$ составляет площадь поверхности микропор (табл. 3). Модифицирование цеолита марганцем и фосфором уменьшает общую величину удельной поверхности, особенно в случае добавки фосфора. Снижение величины удельной поверхности образцов происходит преимущественно за счет уменьшения удельной поверхности микропор до 157 и 102 $\text{м}^2/\text{г}$ для образцов Мп-ВКЦ и Р-ВКЦ соответственно. Следует отметить, что образец Мп-ВКЦ имеет более развитую мезопористую структуру (141 $\text{м}^2/\text{г}$), что может способствовать лучшему проникновению более крупных молекул в поры цеолита, в то время как у Н-ВКЦ и Р-ВКЦ мезопоры менее выражены (104 и 70 $\text{м}^2/\text{г}$ соответственно). Подобные тенденции характерны также для объема пор исследуемых катализаторов. Образцы Мп-ВКЦ и Н-ВКЦ имеют близкий средний диаметр пор (1.8 и 1.9 нм соответственно), а катализатор Р-ВКЦ – немного больший средний диаметр пор (2.0 нм), что оказывает влияние на селективность катализаторов по отношению к различным молекулам, способствуя более избиратель-

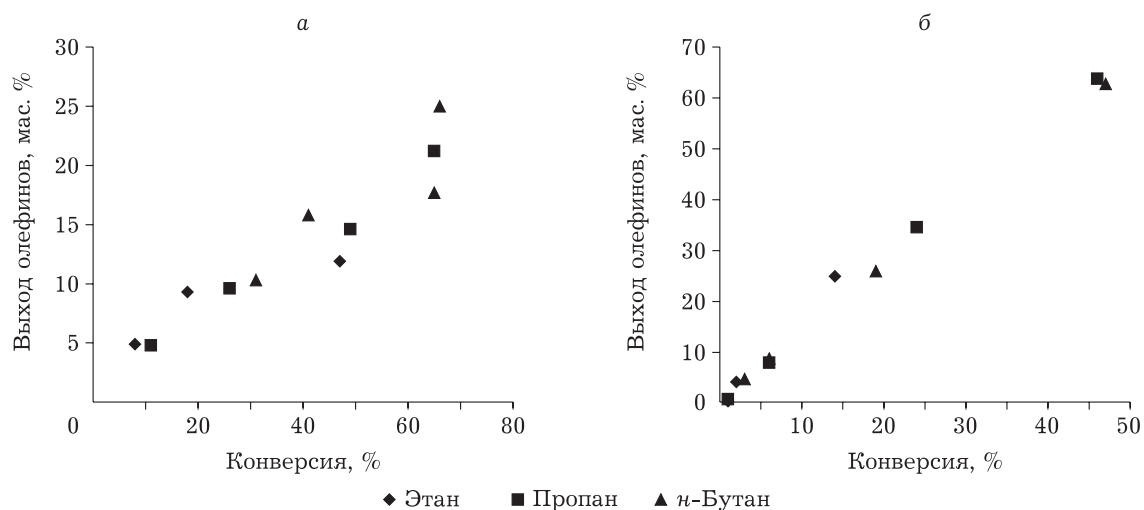


Рис. 2. Зависимость выхода олефиновых углеводородов, образующихся на катализаторах Мп-ВКЦ (а) и Р-ВКЦ (б), от конверсии исходного газообразного сырья (этан, пропан, н-бутан).

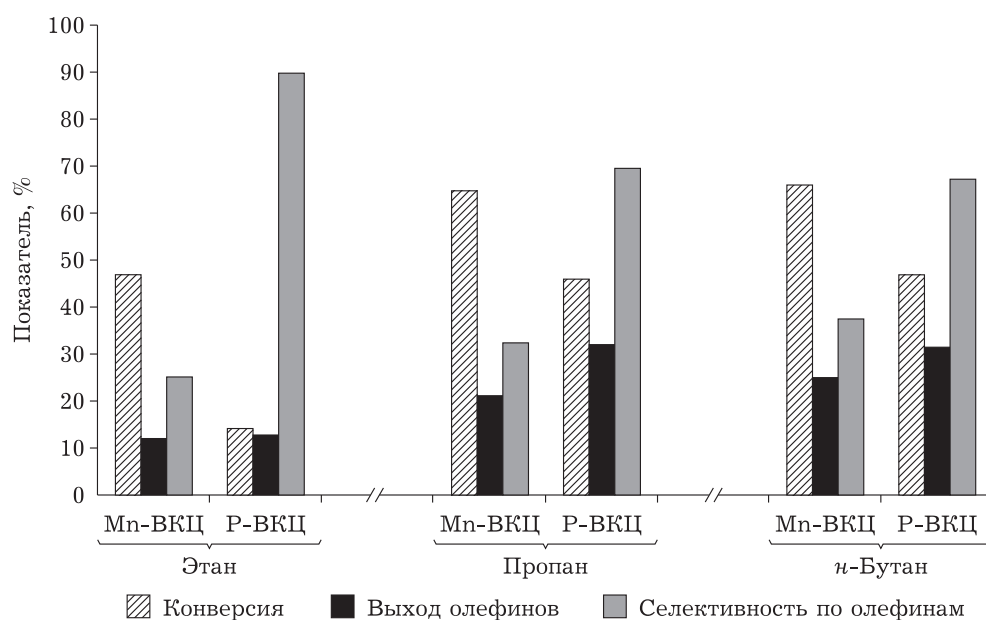


Рис. 3. Сравнительная каталитическая активность цеолитных образцов в процессе превращения алканов C_2-C_4 в олефиновые углеводороды при температуре 650 °C.

ному распределению молекул реагентов в пористой структуре цеолита.

При оценке селективности процесса превращения легких алканов в олефиновые углеводороды на рассматриваемых катализаторах необходимо учитывать, что сравнение проводится при различных значениях конверсии исходных газообразных углеводородов. На рис. 2 приведена зависимость выхода олефиновых углеводородов на цеолитных катализаторах от степени превращения исходных углеводородов. Как видно из представленных данных, при превращении этана на образце Mn-VKЦ наблюдается линейная зависимость выхода олефинов от конверсии этана в диапазоне ее изменения от 8 до 18 % (см. рис. 2, а). При дальнейшем повышении конверсии до 47 % выход олефиновых углеводородов меняется незначительно. Зависимость выхода олефинов от конверсии пропана для данного катализатора носит практически линейный характер во всем интервале изменения конверсии. В то же время при превращении *n*-бутана резкое увеличение выхода олефиновых углеводородов наблюдается только при достаточно высоких значениях конверсии (более 60 %). Это свидетельствует о том, что в пределах точности измерений выход олефиновых углеводородов на катализаторе Mn-VKЦ зависит от состава используемого углеводородного сырья. Для образца P-VKЦ выход олефиновых углеводородов практически линейно связан с конверсией, причем все точки для этана, пропана и бутана рас-

положены почти на одной прямой (см. рис. 2, б). Это означает, что выход олефиновых углеводородов, образующихся на P-содержащем цеолитном катализаторе, не зависит от состава используемого углеводородного сырья.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя полученные результаты, можно сделать соответствующие выводы, которые представлены в виде гистограммы на рис. 3. Модифицированные цеолитные катализаторы проявляют высокую активность в процессе превращения низших алканов C_2-C_4 в олефиновые углеводороды, но наибольшей селективностью обладает цеолит, содержащий фосфор. Селективность образования олефиновых углеводородов при 650 °C при превращении этана на этом образце составляет 87.9 %. Катализатор Mn-VKЦ проявляет более низкую дегидрирующую способность по сравнению с образцом P-VKЦ, но при этом характеризуется более высокой общей активностью. Установлено, что для фосфорсодержащего цеолита выход олефиновых углеводородов практически линейно связан с конверсией этана, аналогичная зависимость также наблюдается при использовании пропана и *n*-бутана. Это свидетельствует о том, что выход целевого продукта на катализаторе P-VKЦ зависит только от конверсии используемого газообразного углеводородного сырья и не зависит от его состава. Для образца Mn-VKЦ наблю-

дается иная зависимость – выход олефиновых углеводородов существенно зависит от степени превращения исходного газообразного углеводорода, а характер этой зависимости обусловлен типом углеводородного сырья. Показано, что при введении в цеолит промотирующих добавок формируются новые активные центры, обладающие различными функциональными свойствами, а также изменяются текстурные характеристики цеолитного носителя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mol J. C. Industrial applications of olefin metathesis // J. Mol. Catal. A: Chem. 2004. Vol. 213, No. 1. P. 39–45.
2. Nicholas C. P. Applications of light olefin oligomerization to the production of fuels and chemicals // Appl. Catal., A. 2017. Vol. 543. P. 82–97.
3. Propylene in demand: roadblocks and opportunities. URL: <https://insights.globalspec.com/article/473/propylene-in-demand-roadblocks-and-opportunities> (accessed 22.10.2024).
4. Amghizar I., Vandewalle L. A., Van Geem K. M., Marin G. B. New trends in olefin production // Engineering. 2017. Vol. 3, No. 2. P. 171–178.
5. Liu S., Zhang B., Liu G. Metal-based catalysts for the non-oxidative dehydrogenation of light alkanes to light olefins // React. Chem. Eng. 2021. Vol. 6, No. 1. P. 9–26.
6. Садыгов Ф. М., Магеррамова З. Ю., Гаджиев Г. Н., Гасанзаде Г. Г., Мамедова И. Г., Меликова Э. Т. Технологический режим установки термического пиролиза углеводородов в сочетании с качественным составом тяжелой смолы // Нефтепереработка и нефтехимия. 2018. № 5. С. 11–15.
7. Ерофеев В. И., Маскаев Г. П. Получение низших олефинов из углеводородного сырья. Термический пиролиз прямогонных бензинов // Междунар. журн. приклад. и фундам. исслед. 2015. № 8-5. С. 880–883.
8. Демиденко М. Н., Магарил Р. З., Магарил Е. Р. Замена водяного пара на водород в процессе пиролиза // Изв. высш. учеб. заведений. Нефть и газ. 2014. № 6 (108). С. 95–99.
9. Меньщиков В. А., Гольдштейн Л. Х., Семенов И. П. Пиролиз в токе водорода – технология и экономика // Изв. высш. учеб. заведений. Нефть и газ. 2014. № 6 (108). С. 102–106.
10. Алиев А. М., Таиров А. З., Гусейнова А. М., Исмаилов Н. Р. Оптимальное управление процессом пиролиза парафиновых углеводородов C_2-C_4 и их смесей // Теорет. основы хим. технологии. 2013. Т. 47, № 4. С. 473–480.
11. Кталхерман М. Г., Намятов И. Г., Емелькин В. А. Влияние определяющих параметров на процесс пиролиза сжиженных нефтяных газов в высокотемпературном потоке теплоносителя // Теорет. основы хим. технологии. 2013. Т. 47, № 6. С. 603–611.
12. Морозов А. Ю., Каратун О. Н., Ельцова А. С. Получение низкомолекулярных олефинов в процессе каталитического пиролиза бензиновой фракции // Нефтепереработка и нефтехимия. 2014. № 1. С. 15–18.
13. Хафизов И. Ф., Мусин Р. Р. Современные тенденции развития процесса пиролиза // Вестн. технолог. ун-та. 2015. Т. 18, № 2. С. 231–234.
14. Чудинов А. Н., Рябов В. Г., Першин Д. В. Влияние состава и свойств сырьевых компонентов каталитического крекинга на выход пропилена // Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Хим. технология и биотехнология. 2020. № 1. С. 40–52.
15. Ганцев А. В., Виниченко М. В. Современное состояние и перспективы развития процесса каталитического крекинга нефтяного сырья // Universum: химия и биология. 2019. № 12 (66). С. 68–71.
16. Халайзаде Т. Р., Юсубов Ф. В. Математическое моделирование процесса каталитического крекинга // Булатовские чтения: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. (31 марта 2020 г.): сб. ст. 2020. Т. 5. Химическая технология и экология в нефтяной и газовой промышленности. Краснодар: Юг, 2020. С. 307–310.
17. Chen S., Chang X., Sun G., Zhang T., Xu Y., Wang Y., Pei C., Gong J. Propane dehydrogenation: catalyst development, new chemistry, and emerging technologies // Chem. Soc. Rev. 2021. Vol. 5, No. 50. P. 3315–3354.
18. Liu S., Zhang B., Liu G. Metal-based catalysts for the non-oxidative dehydrogenation of light alkanes to light olefins // React. Chem. Eng. 2021. Vol. 6, No. 1. P. 9–26.
19. Восмерилов А. А., Восмерикова Л. Н., Восмерилов А. В. Кислотные и каталитические свойства Mg-содержащих цеолитных катализаторов в процессе превращения пропана в олефиновые углеводороды // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66, № 11. С. 42–49.
20. Vosmerikova L. N., Vosmerikov A. A., Markova A. A., Vosmerikov A. V. Preparation of olefinic hydrocarbons from propane over phosphorus-modified ZSM-5 zeolites // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2310, No. 1. Art. 020352.

Поступила в редакцию 01.11.2024

Принята к публикации 20.11.2024