

Обзор катализаторов процесса каталитического крекинга и анализ возможности их расчета по универсальной кинетической модели

Г.Р. Бикбова¹, Г.И. Маннанова², И.М. Губайдуллин^{1,2}

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Первомайская 14, Уфа, Россия, 450044

²Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН, пр. Октября 141, Уфа, Россия, 450075

Аннотация. Процесс каталитического крекинга является специфическим и зависит от нескольких технологических факторов, таких как температура, давление, тип катализатора и реактора, а также от времени контакта. В данной статье представлен обзор зарубежных промышленных цеолитсодержащих катализаторов RD-DMS-PM и российские микросферического катализатор «Октифайн», гранулированные катализаторы крекинга «Адамант». На основе экспериментальных и производственных данных можно проводить математическое моделирование процесса каталитического крекинга; и подбирать константы скоростей химических превращений для каждого из типов катализаторов.

1. Введение

На сегодняшний день во всем мире существует необходимость в получении автомобильных бензинов высокого качества. Одним из способов получения автобензина является процесс каталитического крекинга, который ориентирован на углубление нефтепереработки. Целью данного процесса является получение компонента автомобильного бензина с высоким октановым числом. Кроме этого, при каталитическом крекинге образуется сухой газ, пропан-пропиленовая и бутан-бутиленовая фракции, легкий и тяжелый газойли.

За продолжительный период своего развития, каталитический крекинг значительно совершенствовался как в отношении способа контакта сырья и катализатора (в стационарном слое, в движущемся слое шарикового катализатора, в «кипящем» слое микросферического катализатора в аппаратах с лифт-реактором), так и в отношении применяемых катализаторов (таблетированные на основе природных глин, шариковые синтетические алюмосиликаты, микросферические алюмосиликаты, в том числе цеолитсодержащие). Эти усовершенствования влекли за собой изменения технологии процесса для получения максимально возможного количества бензина [1].

Выбор катализатора процесса играет немаловажную роль, так как от выбранного катализатора зависят выход и качество целевых продуктов, скорость протекания процесса.

В настоящее время среди катализаторов каталитического крекинга лидирующую позицию занимают цеолитсодержащие катализаторы, которые включают в себя:

- матрицу, состоящую из аморфного алюмосиликата;
- активный компонент, в качестве которого применяют цеолиты типа X, Y и ZSM-5;

- ряд добавок, которые повышают активность катализатора [2].

В данной статье приведен обзор ряда катализаторов: RD-DMS-PM, «Октифайн», «Адамант Супер», «Адамант Экстра» и «Люкс».

2. Зарубежные катализаторы

Компания «BASF» производит равновесный цеолитсодержащий катализатор RD-DMS-PM [3] со следующими показателями: насыпная плотность 0,97 г/см³, удельная поверхность 91 м²/г, средний диаметр пор 10,1 нм, фракционный состав (мкм) 20-149, состоящий в основном из оксидов, мас. %. В качестве добавок возможно применение цеолитов ЦВМ (ОАО «АЗКиОС», г. Ангарск) и добавок для увеличения выхода олефинов (МОА) фирмы «BASF». На основе катализатора RD-DMS-PM и цеолитных добавок механическим смешением могут быть приготовлены каталитические смеси, в которых содержание ЦВМ варьируется от 10 до 40 мас.%, а МОА — от 4 до 16 мас.%.

С использованием цеолитных добавок МОА и ЦВМ в RD-DMS-PM значительно повышается выход газообразных продуктов. Содержание ППФ и ББФ в реакционной смеси увеличивается, а бензина – уменьшается. На катализаторе с цеолитом ЦВМ максимальный выход газа (37 %) получен при содержании в каталитической системе 8 % ЦВМ. В состав газа входят фракции: этан-этиленовая (ЭЭФ), пропан-пропиленовая (ППФ) и бутан-бутиленовая (ББФ), которые содержат легкие олефины С₂—С₄.

На катализаторах с большим количеством добавок наблюдается резкое снижение выхода бензиновой фракции — от 42 до 26 %.

Таблица 1. Состав жидких продуктов в крекинге вакуумного газойля.

Катализатор	Продукты, мас. %	
	Ароматические углеводороды	Алканы+олефины+циклические углеводороды
RD-DMS-PM	20	80
RD-DMS-PM+20% МОА	40	60
RD-DMS-PM+8% ЦВМ	70	30

Анализ состава жидких продуктов крекинга показывает, что при введении добавок значительно снижается доля изопарафинов, н-парафинов, олефинов и нафтенов, и увеличивается доля ароматических углеводородов (БТК – бензин, толуол, ксилол).

Технология производства катализаторов фирмы Engelhard [4] имеет ряд особенностей. В качестве матрицы катализатора применяется каолиновая глина. Поверхность матрицы каталитически активна за счет того, что на ней кристаллизуется цеолит, и, благодаря развитой системе макропор, хорошо крекирует остаточное сырье. Однако, вследствие несовершенной технологии синтеза катализатора, структура крупных пор такова, что активность матрицы не селективна и способствует чрезмерному коксо- и газообразованию.

Фирма Grace Davison [4] усовершенствовала высокоэффективные матрицы, имеющие фирменные названия SAM и TMA. Их спецификой является то, что они приготавливаются по специальной технологии на основе активного оксида алюминия. Это позволило разработать катализаторы крекинга нового поколения серий Kristal, Futura и Brilliant, выделяющихся повышенной активностью и высокой селективностью по коксу и газу. Характеристики некоторых катализаторов приведены в таблице 1.

3. Российские катализаторы

Авторами работы [5] была предложена технология изготовления микросферического катализатора «Октифайн». Предлагаемый катализатор содержит цеолит Y в смешанной ионно-обменной форме и матрицу, состоящую из оксида алюминия, каолина и диоксида кремния. Микросферический катализатор крекинга состоит из активного компонента – цеолит Y, отличающийся решеточным модулем и представленный в различной катион-декационированной форме, в частности HY, ReHY и ReY, и матрицы, выполняющая роль

носителя, в которой равномерно распределен активный компонент. Применение данного катализатора позволит получать высокий выход бензиновой фракции, который достигается благодаря уникальному строению катализатора. Катализатор состоит на 0,27% из Na₂O и на 2,3 % из оксидов редкоземельных элементов. Удельная площадь катализатора составляет не менее 300 м²/г, а насыпная плотность от 0,75 до 0,85.

Таблица 2. Характеристика некоторых катализаторов крекинга.

Наименование показателей	Фирма – производитель и марка катализатора					
	Grace		Akzo-Nobel		Enhelhard	
	<i>Kristal-242</i>	<i>Futura-140</i>	<i>Brilliant-242</i>	<i>Advans-937</i>	<i>Kobra</i>	<i>NaphthaMax</i>
Содержание, мас. %	49	42	49	43,5	44,4	44
Al ₂ O ₃						
Na ₂ O	0,25	0,25	0,25	-	-	-
РЗЭ ₂ O ₃	2,8	2,7	2,8	2,32	1,97	2,4
Удельная поверхность, м ² /г	280	290	300	99	134	162
Насыпная плотность, кг/м ³	700	700	710	870	940	860
Микроактивность	79	79	79	69	72	72

В статье [6] сообщается о разработке гранулированного катализатора крекинга «Адамант», представленного двумя основными марками: «Адамант Супер» и «Адамант Экстра».

«Адамант Супер» предназначен для переработки вакуумных газойлей с максимальным выходом бензина и светлых продуктов. Цеолит RENU, имеющий специально подобранный химический состав и микро-, мезопористую структуру, является основой катализатора. Цеолит устойчив к воздействию высоких температур и каталитических ядов, имеет низкую селективность по коксу и сухому газу и высокую селективность по бензину. Катализатор обладает большим объемом пор и благоприятной для крекинга тяжелых углеводородных молекул пористой структурой.

«Адамант Экстра» предназначен для переработки вакуумных газойлей с максимальным выходом легких олефинов, бензина и легкого газойля. Также катализатор позволяет получить высокое октановое число бензина. Цеолит RE-USY, обладающий специфическими кислотными свойствами, является основой катализатора. Низкая плотность кислотных центров в цеолите сводит к минимуму реакции переноса водорода и способствует увеличению содержания олефинов и ароматических углеводородов в жирном газе и бензине, нафтенов в легком каталитическом газойле, а также увеличению октанового и цетанового чисел бензина и легкого газойля соответственно.

Таблица 3. Результаты испытаний в процессе крекинга катализаторов «Адамант Супер» и «Адамант Экстра».

Показатель	Фактическое значение	
	«Адамант Супер»	«Адамант Экстра»
Конверсия, мас. %	50,3	42,3
Выход на сырье, мас. %		
газ (H ₂ , C ₁ -C ₄)	15,8	12,2
бензин (C ₅ -150 °С)	31,3	27,2
легкий каталитический газойль (150 – 360 °С)	42,6	45,4
тяжелый каталитический газойль (>360 °С)	7,1	12,3
кокс	3,2	2,9
Суммарный выход светлых нефтепродуктов	73,9	72,6

Примечание. Условия испытаний: вместимость катализатора 50 см³; удельная скорость подачи сырья 1,8 ч⁻¹; температура 460 °С.

Из таблицы 3 следует, что суммарный выход светлых нефтепродуктов выше, а выход тяжелого каталитического газойля ниже.

В работе [7] авторами приведена новая серия эффективных катализаторов крекинга вакуумного газойля. За основу разработки взят катализатор «Люкс» с дополнительным активным компонентом — цеолитом типа ZSM-5 в различном соотношении с ультрастабильным цеолитом НРЗЭУ. Бицеолитные катализаторы крекинга повышают октановое число бензина крекинга за счёт частичного крекинга нормальных парафинов и увеличения отборов пропан-пропиленовой и бутан-бутиленовой фракций при некотором снижении отбора бензиновой фракции. Величина снижения отбора зависит от содержания цеолита типа ZSM-5 в составе бицеолитного катализатора.

Таблица 4. Отборы бензина, ППФ и ББФ (% мас.) при различном содержании цеолита типа ZSM-5 в композиции бицеолитных катализаторов.

Отборы	Содержание цеолита ZSM-5, % мас.				
	0	2	4	6	8
ППФ	9,0	9,4	9,5	10,2	11,2
ББФ	15,4	15,9	15,9	16,4	17,6
Бензин	45,0	44,6	44,4	42,5	40,9
Конверсия сырья	79,0	79,3	79,6	80,2	81,3

Как видно из таблицы 4, при увеличении содержания цеолита ZSM-5 в композиции катализатора до 8% мас. значительно снижается отбор бензина крекинга при пропорциональном увеличении отборов пропан-пропиленовой (ППФ) и бутанбутиленовой (ББФ) фракций. При этом увеличение конверсии сырья связано с уменьшением отборов лёгкого и тяжёлого газойлей. Выходы сухого газа и кокса при увеличении содержания цеолита ZSM-5 в композиции катализатора остаются практически неизменными. Полученные данные показывают, что увеличение отборов ППФ и ББФ без значительного снижения выхода бензиновой фракции можно достигнуть при вовлечении в композицию катализатора серии «Люкс» от 2 до 4% цеолита ZSM-5.

В статье [8] авторы рассмотрели новый отечественный цеолитсодержащий катализатор типа У по технологии аэрозольного нанокатализа в виброоживленном слое. Каталитическая система состоит из катализатора с размером частиц от 200 до 300 мкм и диспергирующего материала, представляющий собой стеклянные шарики с диаметром от 1 до 1,2 мм. При диспергировании частичек катализатора образуются наночастицы с гиперактивной поверхностью. Новый катализатор позволил повысить избирательность процесса по светлым нефтепродуктам.

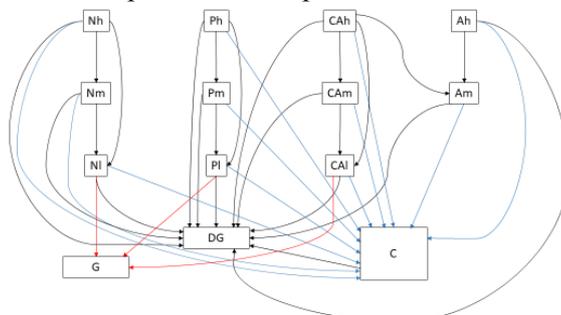


Рисунок 1. Схема превращений в четырнадцатикомпонентной кинетической модели процесса каталитического крекинга.

Как видно из таблицы 5, конверсия сырья не превышает 59,6 % мас. за один проход, однако селективность очень высока. Наиболее высокие показатели селективности процесса наблюдается при температурах 450 и 500°С. Это объясняется тем, что образование газовой

фракции в этих условиях незначительно. Благодаря достигнутой селективности по светлым нефтепродуктам в значительной степени можно сократить затраты на стадии разделения нефтепродуктов.

Таблица 5. Результаты экспериментальных исследований каталитического крекинга на цеолитсодержащем катализаторе типа Y.

№	t, °C	f, Гц	Состав продуктов крекинга, % мас.				X, % мас.	Φ, % мас.	x, % мас.	Скорость крекинга	
			кокс	газ	бензиновая фракция	дизельная фракция				кг/(м ³ *ч)	кг/(кг _{кат} *ч)
1	450	4	1,4	0	7,2	28,2	36,8	96,2	35,4	541,6	180533
2	500		1,7	2	2,6	7,9	14,4	72,5	10,5	160,1	53360
3	550	4,5	2	4	10,7	42,4	59,6	89,1	53,1	812,1	270703
4	450		1,3	0	0	14,1	15,4	91,5	14,1	215,0	71653
5	500	5	1,4	2,3	0	9,7	13,4	72,6	9,7	148,5	49503
6	550		1,5	4,8	0	8,4	14,7	57,2	8,4	128,9	42959
7	450	5,5	1,3	0,3	3,7	21,4	26,6	94,0	25	382,5	127500
8	500		1,4	1,7	6,5	17,7	27,2	88,6	24,1	369,1	123033
9	550	6	1,8	5,4	6,7	13,7	27,5	73,9	20,4	311,4	103800
10	450		1,2	0	0	19,1	20,3	94,1	19,1	291,9	97290
11	500	6,2	1,2	0	4,7	37,2	43	97,2	41,3	639,5	213152
12	550		1,5	1,1	7,1	9,4	19,1	86,3	16,5	252,2	84057
13	450	6,5	0,9	0	5,4	15,6	21,9	95,9	21	320,6	106865
14	500		1,2	0	6,5	20,8	28,5	95,8	27,3	417,2	139056
15	550		1,5	6,2	8,7	24,3	40,8	81,1	33	505,1	168355

Таблица 6. Обозначения и молекулярные массы компонентов кинетической модели каталитического крекинга.

Обозначение	Название	Мол. масса, кг/кмоль
Ph	Тяжелые парафины	400
Nh	Тяжелые нафтены	400
Ah	Тяжелые ароматические соединения	400
CAh	Тяжелые соединения с ароматическими заместителями	400
Pm	Средние парафины	200
Nm	Средние нафтены	200
Am	Средние ароматические соединения	200
CAm	Средние соединения с ароматическими заместителями	200
Pl	Легкие парафины	100
Nl	Легкие нафтены	100
Al	Легкие ароматические соединения	100
C	Кокс	-
DG	Сухой газ	18,4
G	Жирный газ	≈ 50

4. Анализ возможности расчета

Нами предлагается четырнадцатикомпонентная кинетическая модель процесса каталитического крекинга (рисунок 1) [9]. Данная модель позволит оценить выход и качество продуктов, таких как жирный газ, бензин, каталитический газойль.

В таблице 6 приведены обозначения компонентов, применяемых в кинетической модели.

На основе схемы превращений, приведенной на рисунке 1, составлена система дифференциальных уравнений, характеризующая кинетическую модель каталитического крекинга:

$$\begin{aligned} \frac{d[y_1]}{dt} &= -k_1[y_1] - k_8[y_1] - k_{12}[y_1] - k_{23}[y_1] \\ \frac{d[y_2]}{dt} &= -k_2[y_2] - k_9[y_2] - k_{13}[y_1] - k_{24}[y_2] \\ \frac{d[y_3]}{dt} &= -k_3[y_3] - k_{10}[y_3] - k_{14}[y_3] - k_{25}[y_3] - k_{11}[y_3] \\ \frac{d[y_4]}{dt} &= -k_4[y_4] - k_{15}[y_4] - k_{26}[y_4] \\ \frac{d[y_5]}{dt} &= 2k_1[y_1] - k_5[y_5] - k_{16}[y_5] - k_{27}[y_5] \\ \frac{d[y_6]}{dt} &= 2k_2[y_2] - k_6[y_6] - k_{17}[y_6] - k_{28}[y_6] \\ \frac{d[y_7]}{dt} &= 2k_3[y_3] - k_7[y_7] - k_{18}[y_7] - k_{29}[y_7] \\ \frac{d[y_8]}{dt} &= 2k_4[y_4] + 2k_{11}[y_3] - k_{19}[y_8] - k_{30}[y_8] \\ \frac{d[y_9]}{dt} &= 2k_5[y_5] + 4k_8[y_1] - k_{20}[y_9] - k_{31}[y_9] - k_{34}[y_9] \\ \frac{d[y_{10}]}{dt} &= 2k_6[y_6] + 4k_9[y_2] - k_{21}[y_{10}] - k_{32}[y_{10}] - k_{35}[y_{10}] \\ \frac{d[y_{11}]}{dt} &= 2k_7[y_7] + 4k_{10}[y_3] - k_{22}[y_{11}] - k_{33}[y_{11}] - k_{36}[y_{11}] \\ \frac{d[y_{12}]}{dt} &= k_{12}[y_1] + k_{13}[y_2] + k_{14}[y_3] + k_{15}[y_4] + k_{16}[y_5] + k_{17}[y_6] + k_{18}[y_7] + k_{19}[y_8] + k_{20}[y_9] + k_{21}[y_{10}] + k_{22}[y_{11}] \\ \frac{d[y_{13}]}{dt} &= k_{23}[y_1] + k_{24}[y_2] + k_{25}[y_3] + k_{26}[y_4] + k_{27}[y_5] + k_{28}[y_6] + k_{29}[y_7] + k_{30}[y_8] + k_{31}[y_9] + k_{32}[y_{10}] \\ &\quad + k_{33}[y_{11}] \\ \frac{d[y_{14}]}{dt} &= k_{34}[y_9] + k_{35}[y_{10}] + k_{36}[y_{11}] \end{aligned}$$

Как видно из пояснений в таблице 6, разделение на компоненты произведено с учетом их структурного и массового состава, что дает возможность оценивать количественные выходы бензина, каталитических газойлей, жирного газа и потери с сухим газом и коксом, и качественные показатели получаемых продуктов. Нас интересует процесс каталитического крекинга с получением бензина в качестве целевого продукта.

Для создания базы данных констант по катализаторам также допустим расчет процесса каталитического крекинга с повышенным выходом ППФ и ББФ по нашей четырнадцатикомпонентной модели. Несмотря на то, что с использованием цеолитных добавок МОА и ЦВМ повышается выход ППФ и ББФ в реакционной смеси, а бензина – уменьшается; новый отечественный цеолитсодержащий катализатор типа Y - увеличивается избирательность по светлым нефтепродуктам, имеет смысл провести расчет кинетики превращений при данном катализаторе по четырнадцатикомпонентной модели.

Для нашей модели также подходят процессы с применением катализаторов «Люкс» на основе ультраствбильного цеолита Y, «Адамант Экстра», «Октифайн», так как при этом наблюдается увеличение октанового числа бензиновой фракции.

Одной из целей кинетического исследования является выбор формы кинетических уравнений и нахождение кинетических констант.

Нами были решены прямая и обратная задачи на основании данных [7].

Для решения обратной задачи применяли поиск минимизации функции пакета MatLAB. Расчет произведен для процесса каталитического крекинга с применением катализатора «Люкс».

Для нахождения кинетических констант минимизируется функция суммы модулей разностей экспериментальных и расчетных концентраций с использованием генетического алгоритма пакета MatLAB. Результаты представлены в таблице 7.

Таблица 7. Расчетные кинетические константы процесса каталитического крекинга с применением катализатора «Люкс».

Компоненты	Константы
K ₁	4.8875
K ₂	5.9044
K ₃	0.10655
K ₄	2.8031
K ₅	7.6444
K ₆	1.6104
K ₇	5.4507
K ₈	0.97944
K ₉	0.043696
K ₁₀	0.31803
K ₁₁	0.31665
K ₁₂	8.7216
K ₁₃	3.9295
K ₁₄	1.4669
K ₁₅	2.5238
K ₁₆	0.20479
K ₁₇	0.046801
K ₁₈	2.9029
K ₁₉	0.18867
K ₂₀	0.085212
K ₂₁	0.11097
K ₂₂	0.0025593
K ₂₃	6.2816
K ₂₄	3.4688
K ₂₅	0.35569
K ₂₆	1.7373
K ₂₇	1.0916
K ₂₈	0.059511
K ₂₉	0.46295
K ₃₀	0.0040027
K ₃₁	0.080006
K ₃₂	0.15746
K ₃₃	0.0024528
K ₃₄	0.011989
K ₃₅	0.075628
K ₃₆	0.97685

На основании данных минимизации можно сделать вывод, что четырнадцатикомпонентная модель хорошо описывает процесс каталитического крекинга с применением различных катализаторов. Расчеты показали целесообразность использования генетического алгоритма. Можно утверждать, что выбор пакета MatLaB сказывается на корректности полученных результатов.

В дальнейшем возможно уточнение универсальной кинетической модели, которая позволяет описывать процесс каталитического крекинга с применением любых типов катализаторов, а также подбор констант скоростей реакции для разных видов катализаторов.

5. Заключение

На сегодняшний день можно сделать вывод, что из зарубежных катализаторов не уступают известным импортным аналогам марки Kristal-242, Futura-140, Brilliant-242 фирмы Grace, а в российских - «Адамант», а по ряду параметров даже превосходят их.

Принципиальным отличием технологии КНТ Групп является то, что цеолит сначала кристаллизуется и подвергается ионообменным обработкам и только потом вносится в состав матрицы. Поэтому содержание редкоземельных элементов в катализаторе «Адамант» остается одинаковым как до, так и после истирания, а иностранные производители используют технологию кристаллизации цеолитового компонента на поверхности предварительно сформованных гранул. В процессе эксплуатации на промышленных установках с движущимся слоем происходит истирание катализатора и удаление его наружных слоев. Вместе с наружными слоями удаляется и наиболее активный цеолитовый компонент, в результате такой катализатор дезактивируется быстрее, чем катализатор, в котором активный компонент равномерно распределен по всему объему.

Другой особенностью катализаторов серии «Адамант» является низкое остаточное содержание натрия (в 2—3 раза ниже, чем в импортных аналогах). Технология КНТ Групп дает относительную свободу в конструировании композиционного состава катализатора. Тогда как у зарубежных производителей гранулы состоят преимущественно из каолина, а содержание цеолита в катализаторе регулируется продолжительностью кристаллизации, в технологии КНТ Групп состав матрицы более разнообразен, а содержание цеолита может легко меняться на стадии формовки. Катализаторы «Адамант» обладают более высокой гидротермической стабильностью. При многократных термopаровых обработках они лучше сохраняют удельную площадь поверхности и каталитическую активность. В процессе крекинга катализаторы «Адамант» демонстрируют высокий суммарный выход светлых нефтепродуктов и низкий выход тяжелого каталитического газойля.

Наиболее существенная особенность технологии производства катализаторов крекинга фирмы Engelhard – метод имплантации цеолита в частички катализатора. Большинство фирм сначала смешивают цеолит и матрицу, а затем подвергают распылительной сушке образовавшийся золь с получением микросферических частичек. По технологии фирмы Engelhard вначале вырабатывают микросферы матрицы, а затем выкристаллизовывают цеолит внутри этих микросфер.

В связи с переводом современных установок каталитического крекинга на режим работы с коротким временем контакта сырья с катализаторами все ведущие фирмы, занимающиеся их синтезом, стали выпускать промышленные образцы, содержащие в своей структуре значительное количество крупных пор, что положительно сказывается на скорости диффузии больших молекул углеводородов к активным центрам. Использование широкопористых катализаторов приобретает особое значение, так как в реакторе этого типа установок время контакта катализатора с сырьем исчисляется долями секунды.

Цеолитсодержащий катализатор RD-DMS-PM позволяет получать ППФ и ББФ, а катализатор «Адамант Супер» - бензин и светлые продукты. Максимальный выход легких олефинов, бензина и легкого газойля возможен при применении катализатора «Адамант Экстра», также катализатор позволяет получить высокое октановое число бензина. Отечественный цеолитсодержащий катализатор типа Y позволил повысить избирательность процесса по светлым нефтепродуктам. Применение биеолитного катализатора привело к снижению отбора бензиновой фракции, однако отбор ППФ и ББФ увеличился при увеличении содержания в них олефиновых углеводородов.

Катализаторы серии «Люкс» на основе ультраствильного цеолита Y обладают повышенной активностью, термостабильностью, улучшенными механическими свойствами, обеспечивают увеличение октанового числа бензиновой фракции, а также обладают повышенной износоустойчивостью.

Актуальна задача по разработке базы данных констант превращений каталитического крекинга с применением различных новых и модифицированных существующих катализаторов

для ее дальнейшего применения при проведении инженерных и технологических расчетов реакторов каталитического крекинга.

6. Литература

- [1] Солодова, Н.Л. Современное состояние и тенденции развития каталитического крекинга нефтяного сырья / Н.Л. Солодова, Н.А. Терентьева // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 1. – С. 141-147.
- [2] Гильмутдинов, А.Т. Обзор современных катализаторов, используемых в процессах каталитического крекинга / А.Т. Гильмутдинов, Л.З. Хисамова // Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019. – С. 11-13. DOI: 10.24411/2545-0.81X-2019-10502.
- [3] Седгхи, Р.Б.Ф. Изучение влияния добавок ZSM-5 к катализаторам крекинга для повышения выхода легких олефинов и пропилена / Р.Б.Ф. Седгхи, В.М. Капустин, И.М. Герзелиев, В.Ф. Третьяков // Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012.
- [4] Технология переработки нефти и газа. Часть 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tehnoinfo.ru/pererabotkanefitigaza/21.html> (29.11.2019).
- [5] Бодрый, А.Б. Микросферический катализатор крекинга "Октифайн" и способ его приготовления / А.Б. Бодрый, И.Ф. Усманов, Э.М. Рахматуллин, А.Ш. Тагиров, Р.С. Илибаев, Л.В. Суркова, Г.Ф. Гариева // Катализ в промышленности. – 2014. – № 9. – С. 3.
- [6] Бодрый, А.Б. О новых гранулированных катализаторах каталитического крекинга / А.Б. Бодрый, Э.М. Рахматуллин, Р.С. Илибаев, Г.Ф. Гариева // Катализ в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 20.
- [7] Глазов, А.В. Разработка бицеолитного катализатора крекинга и результаты его эксплуатации на секции 200 комплекса КТ-1/1/ А.В. Глазов, О.И. Дмитриченко, Н.В. Короткова, В.И. Горденко, В.П. Доронин, Т.П. Сорокина, П.В. Липин // Институт проблем переработки углеводородов Сибирского отделения РАН, 2012. – С. 8.
- [8] Кашеев, А.С. Изучение поведения цеолитсодержащего катализатора типа Y в условиях аэрозольного нанокатализа / А.С. Кашеев, И.М. Глинкина, С.А. Кудрявцев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 2, № 6.
- [9] Маннанова, Г.И. Разработка четырнадцатикомпонентной кинетической модели каталитического крекинга / Г.И. Маннанова, И.М. Губайдуллин, Г.Р. Бикбова // Математическое моделирование процессов и систем: Материалы IX Международной молодежной научно-практической конференции, 2019. – С. 235-240.
- [10] Иванчина, Э.Д. Разработка кинетической модели процесса каталитического крекинга / Э.Д. Иванчина, Е.Н. Ивашкина, Г.Ю. Назарова, В.И. Стебенева, Т.А. Шафран, С.В. Киселева, Д.В. Храпов, Н.В. Короткова, Р.В. Есипенко // Катализ в нефтеперерабатывающей промышленности. – 2017, № 6.

Review of catalysts of catalytic cracking process and analysis of possibility of their calculation by universal kinetic model

G.R. Bikbova¹, G.I. Mannanova², I.M. Gubaydullin^{1,2}

¹Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov str., 1, Ufa, Rep. Bashkortostan, 450062

²Institute of Petrochemistry and Catalysis of the Russian Academy of Sciences, prospect October, 141, Ufa, Rep. Bashkortostan, 450075

Abstract. The catalytic cracking process is specific and depends on several technological factors such as temperature, type of catalyst and reactor, and contact time. This article presents a review of foreign industrial zeolite-containing catalysts RDM SWM, and Russian microspherical catalyst "Oktifayn", granular cracking catalysts "adamant". On the basis of experimental and production data it is possible to make mathematical modeling of catalytic cracking process, and to pick up a set of constants of rates of chemical transformations for each of types of catalysts.