к.х.н., с.н.с. Ларіна О.В.; д. філософ., м.н.с. Валігура К.В.;
к.х.н., с.н.с. Жох О.О.; к.х.н., м.н.с. Пертко О.П.

РОБОТА

«Створення нових поліфункціональних каталізаторів процесів «зеленої хімії» для отримання промислово важливих органічних продуктів з відновлювальної сировини»

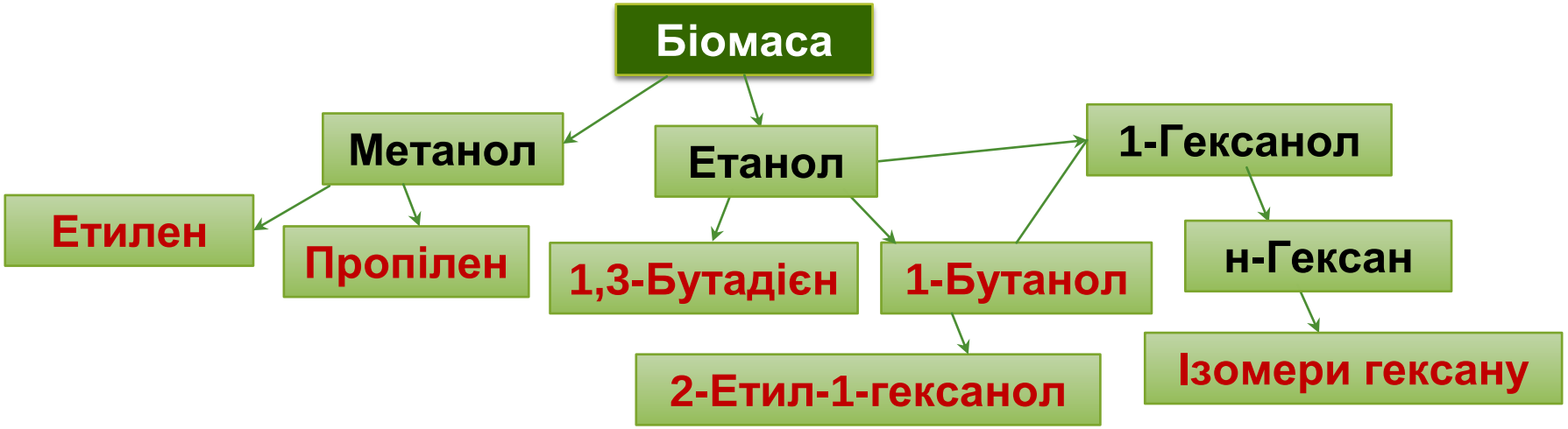
висувається для участі у конкурсі зі здобуття премії
Президента України для молодих вчених у 2022 р.

Представлено Інститутом фізичної хімії
ім. Л.В. Писаржевського НАН України

Мета роботи

З'ясування впливу складу каталітичних систем на основі оксидів (Mg, Al, Zr, Si) та цеолітів (структурних типів BEA, MFI, MOR, FAU) на функціональні властивості їх поверхні, визначення шляхів регулювання цих властивостей для досягнення високої активності, селективності та стабільності роботи в процесах одержання промислово важливих вуглеводнів (етилену, пропілену, 1,3-бутадієну, ізомерів гексану) та оксигенатів (1-бутанолу, 2-етил-1-гексанолу) з відновлювальної сировини (біоспиртів) та розроблення нових ефективних поліфункціональних каталізаторів таких процесів.

Актуальність роботи



У роботі представлено результати досліджень нових поліфункціональних каталізаторів для процесів отримання промислово важливих вуглеводнів (етилену, пропілену, 1,3-бутадієну, ізомерів гексану) та оксигенатів (1-бутанолу, 2-етил-1-гексанолу) з $C_{1,2,4}$-біоспиртів шляхом послідовних перетворень.

Наукові завдання роботи

- Визначення впливу складу оксидних каталізаторів Zn(Ag)/Mg(Zr, La)-Si та методів їх приготування на кислотно-основні та каталітичні властивості в ЕТВ-процесі;
- Встановлення впливу характеристик пористої структури кремнеземовмісного компоненту ZnLaZrSi-оксидних систем на їх каталітичні властивості у процесі отримання 1,3-бутадієну із етанол-водних сумішей;
- З'ясування природи дезактивуючого дії води на процес перетворення етанолу в 1,3-бутадієн у присутності оксидних Zn-Zr(La)-Si та цеолітних Cu(Ag, Zn)/Ta/SiBEA каталізаторів;
- З'ясування впливу співвідношення Mg/Al в системах $MgO-Al_2O_3$ на концентрацію і силу кислотних/основних центрів поверхні та каталітичні властивості в процесах перетворення етанолу в 1-бутанол та 1-бутанолу в 2-етил-1-гексанол;
- Встановлення впливу модифікуючих добавок (La_2O_3, CeO_2, Y_2O_3) на кислотно-основні характеристики поверхні та каталітичні властивості (активність, селективність) систем на основі $MgO-Al_2O_3$ і ZrO_2 стосовно процесу перетворення етанолу в 1-бутанол;
- З'ясування впливу співвідношення компонентів у складі систем на основі цеоліту структурного типу MFI і Al_2O_3 на їх структурні і кислотні характеристики, що визначають активність отриманих каталізаторів у реакції перетворення метанолу до етилену та пропілену;
- Встановлення впливу кінетичного розміру молекули реагенту, теплоти адсорбції, розміру мікропор, а також завуглецювання поверхні на режим дифузії реагентів у зерні каталізатора;
- Встановлення закономірностей зміни активності та селективності перетворення *н*-гексану на моно- та біметалічних цеолітних каталізаторах з різним вмістом металічної компоненти;
- З'ясування ролі активних центрів зовнішньої поверхні цеолітних каталізаторів кислотного і основнòго типу у процесах перетворення вуглеводнів, встановлення шляхів підвищення селективності за визначеними цільовими продуктами та стабільності роботи у часі.

Реалізація тандем-процесів на біфункціональних каталізаторах

"A cascade reaction, also known as a domino reaction or **tandem reaction**, is a process involving two or more consecutive reactions in which subsequent reactions result as a consequence of the functionality formed by bond formation or fragmentation in the previous step." ***Angew. Chem. Int. Ed. 1993, 32, 131–163.***

Промисловий процес отримання

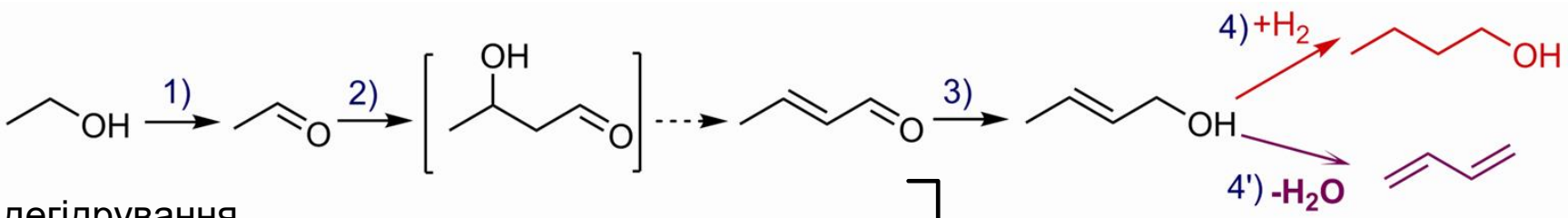
пропілен → Гідроформілювання на Co, Rh або Ru → **1-бутаналь** → Гідрування на Ni (~30 МПа) → **1-бутанол**

Альтернативний спосіб отримання

етанол → Газофазна конденсація (в реакторі проточного типу) на Mg-Al оксидних системах, Ca-фосфатах → **1-бутанол**

Одна з ключових умов перебігу тандем-процесів – наявність активних центрів різних типів на поверхні каталізаторів.

Схема перетворення етанолу в 1-бутанол / 1,3-бутадієн



1) дегідрування
2) альдоль-кротонова конденсація
3) відновлення за Меєрвейном-Пондорфом-Верлеєм

} спільні стадії процесів

4) гідрування / 4') дегідратація

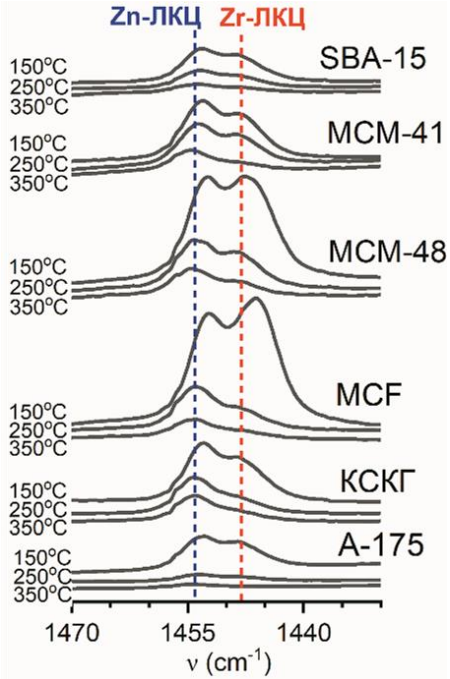
Вплив природи силікатного носія у складі ZnLaZr/Si оксидних систем в процесі перетворення етанол-водних сумішей в 1,3-бутадієн

Силікатний носій в ZnLaZr/Si каталізаторі	W, год$^{-1}$	X, %	S(БД), %	S(АА), %	S(етен+ДЕЕ), %
SBA-15	0,4	49	63	11	19
MCM-41	0,8	51	55	6	34
MCM-48	1,2	52	41	5	49
MCF	0,4	54	48	10	37
КСКГ	0,4	58	68	7	18
A-175	0,4	64	65	10	19

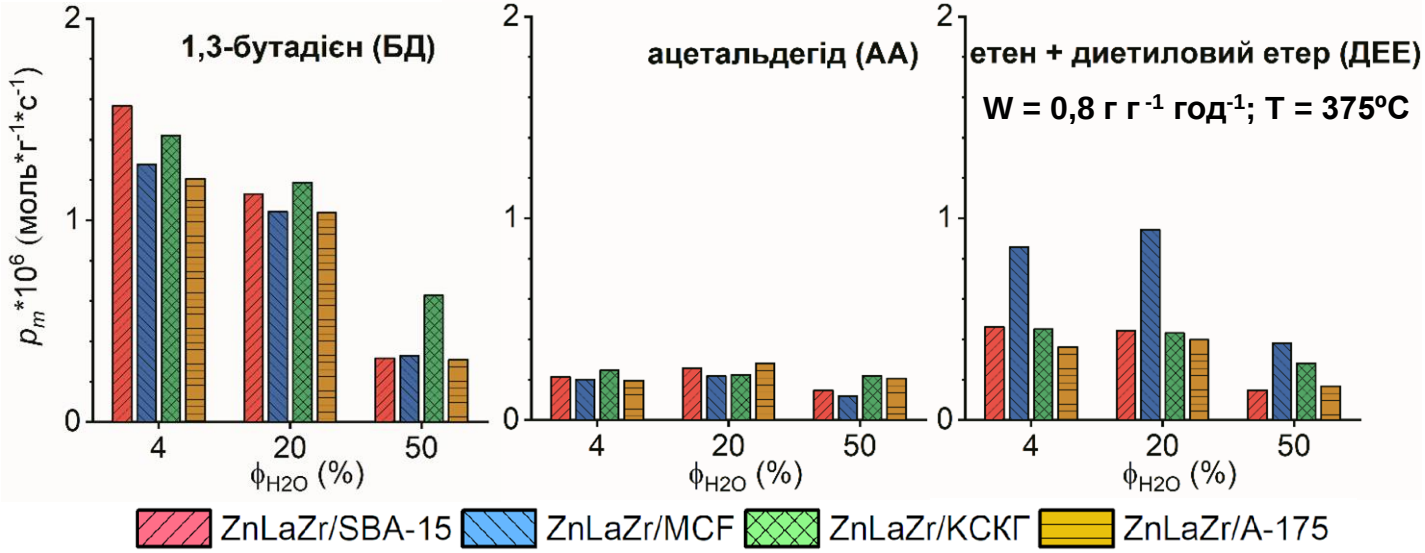
80 % етанол; T = 375ºC

- Природа силікатного носія визначає кислотно-основні властивості ZnLaZr/Si оксидних систем.
- Найбільші значення селективності за БД та швидкості утворення БД – у присутності каталізаторів, приготованих на основі кремнеземів КСКГ та SBA-15, які характеризуються вмістом та співвідношенням Zn- та Zr-вмісних ЛКЦ близькими до оптимальних.

ІЧС з піридином на ZnLaZr/Si зразках

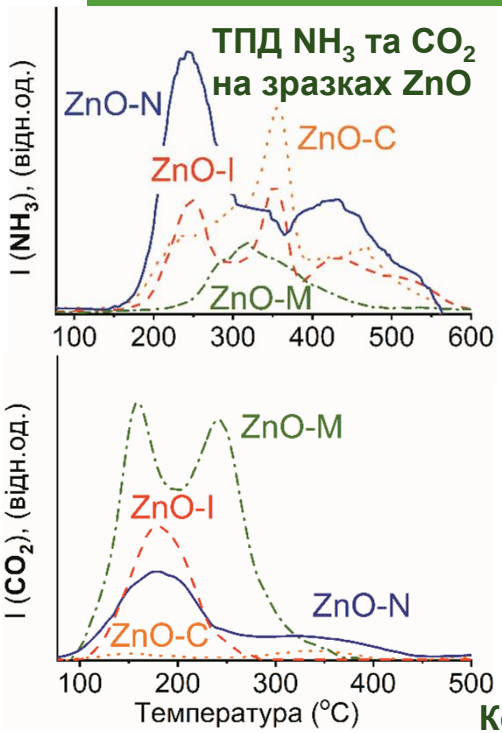


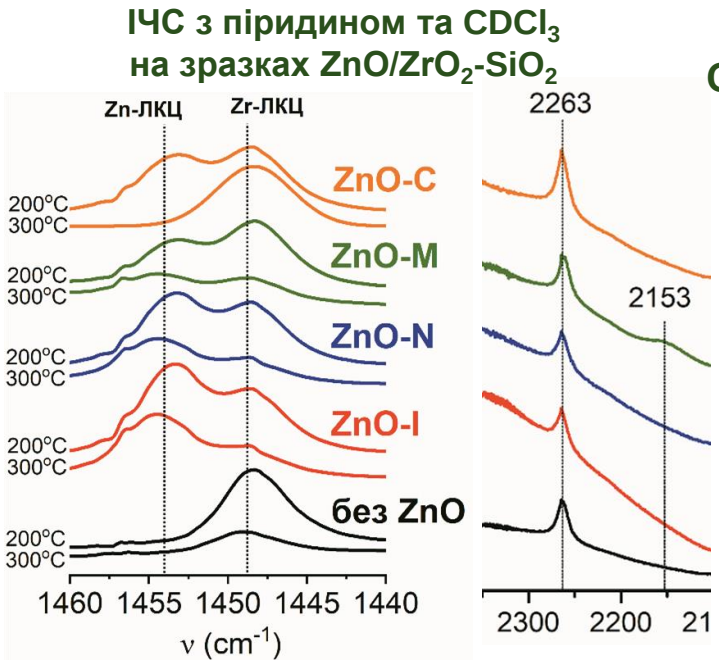
Швидкості утворення



O.V. Larina et al. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 4(44) (2020) 16600
P.I. Kyriienko, O.V. Larina et al. Theor. Exp. Chem. 56 (2020) 329

Вплив способу приготування та введення дегідруючої добавки (ZnO) на каталітичні властивості ZnO/ZrO_2-SiO_2 систем



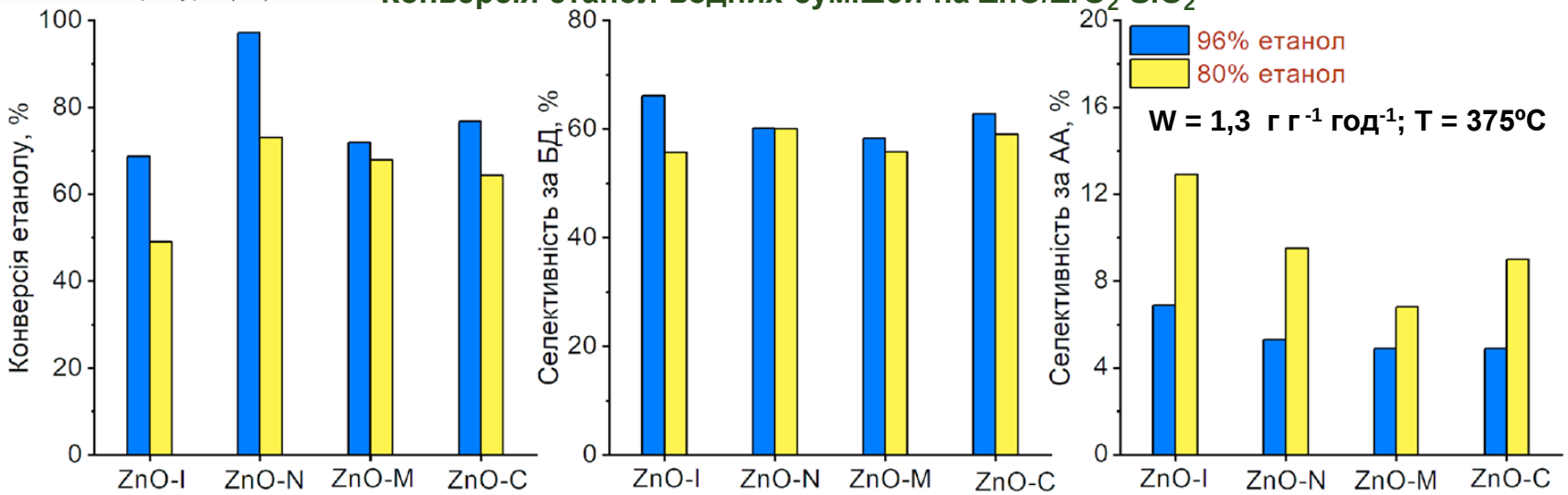


Спосіб приготування

- ✔ Просочення ZrO_2-SiO_2 ацетатом цинку (**ZnO-Impregnation**)
- ✔ Вологе змішування ZrO_2-SiO_2 з частинками ZnO:
  - **Nano**
  - **Macro**
  - **Commercial** (**AG CHEMI GROUP s.r.o.**)

Найбільш активний каталізатор – **ZnO-N/ZrO_2-SiO_2**

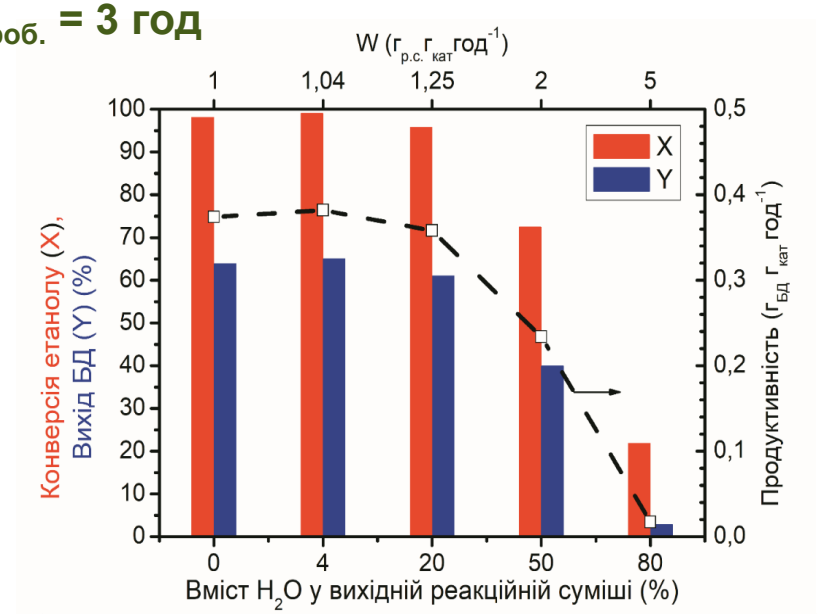
Конверсія етанол-водних сумішей на ZnO/ZrO_2-SiO_2

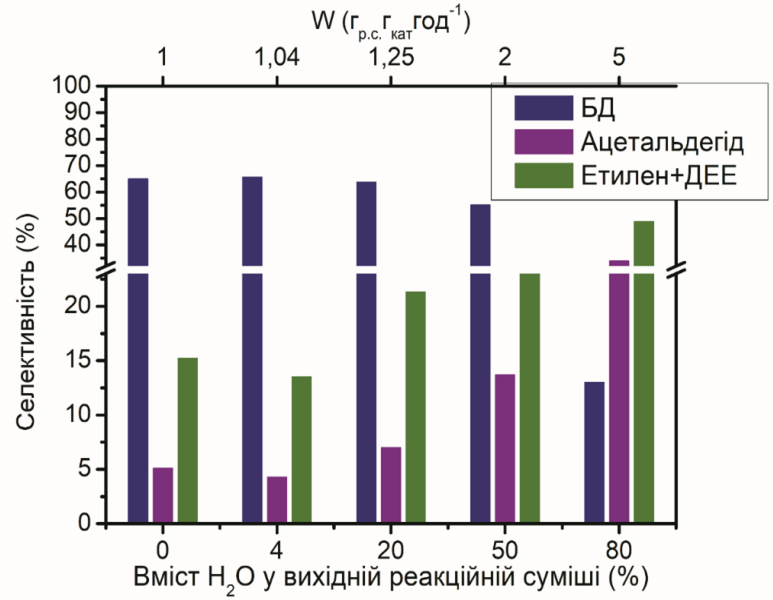


O.V. Larina et al. Catalysis Science and Technology 9 (2019) 3964, Патент України № 133763 (2019)

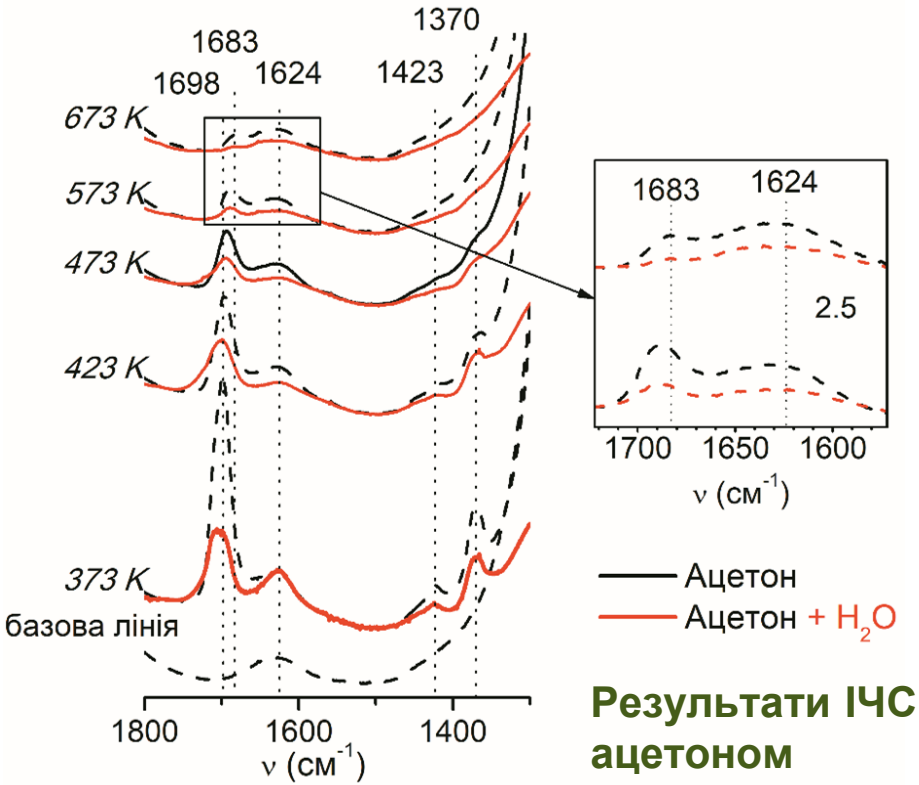
Природа дезактивуючої дії води на процес перетворення етанолу в 1,3-бутадієн у присутності оксидних Zn-Zr(La)-Si каталізаторів

T = 400°C, W_{EtOH} = 1 год$^{-1}$, $W_{р.с.}$ = 1-5 год$^{-1}$, $t_{роб.}$ = 3 год

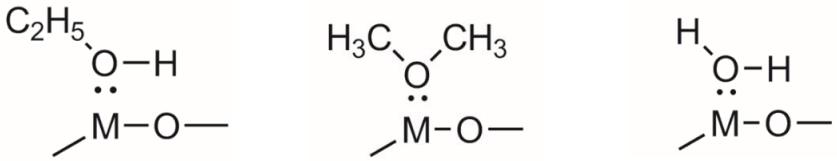




Розроблено **Zn-La-Zr-Si**-оксидний каталізатор, придатний для отримання 1,3-бутадієну при конверсії етанол-водних сумішей.



Результати ІЧС з ацетоном

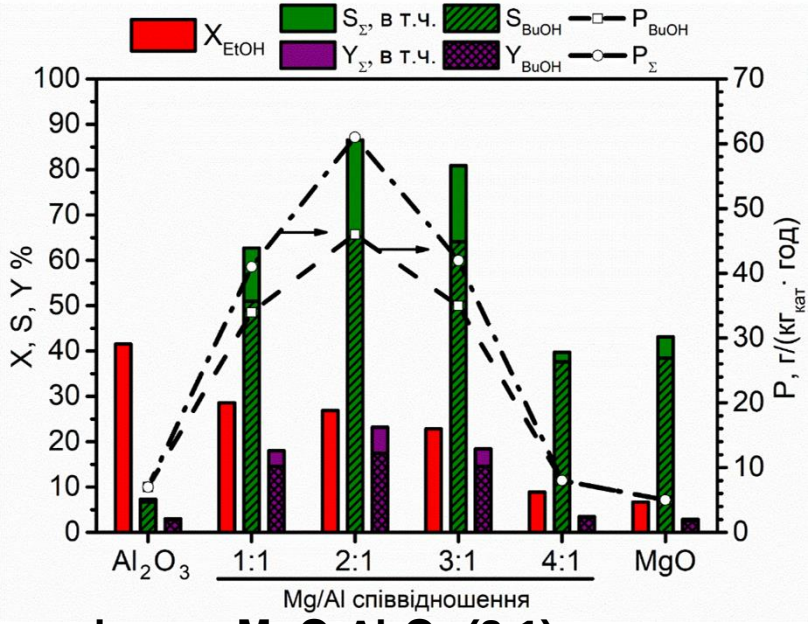


O.V. Larina et al. React. Kinet. Mech. Catal. 127 (2019) 903.

Каталітичні властивості систем $MgO–Al_2O_3$ в процесі перетворення EtOH → BuOH та BuOH → 2-EH

Каталізатор	Концентрація кислотних центрів C_a, ммоль NH_3/г	Концентрація основних центрів C_b, ммоль CO_2/г	C_a/C_b
MgO	0,15	0,18	0,8
Mg-Al-4	0,46	0,13	3,5
Mg-Al-3	0,80	0,25	3,2
Mg-Al-2	0,61	0,21	2,9
Mg-Al-1	0,58	0,30	1,9
Al_2O_3	0,94	0,24	3,9

t = 300 °C; W_{EtOH} = 0,235 $л_{EtOH}/(л_{кат}·год)$

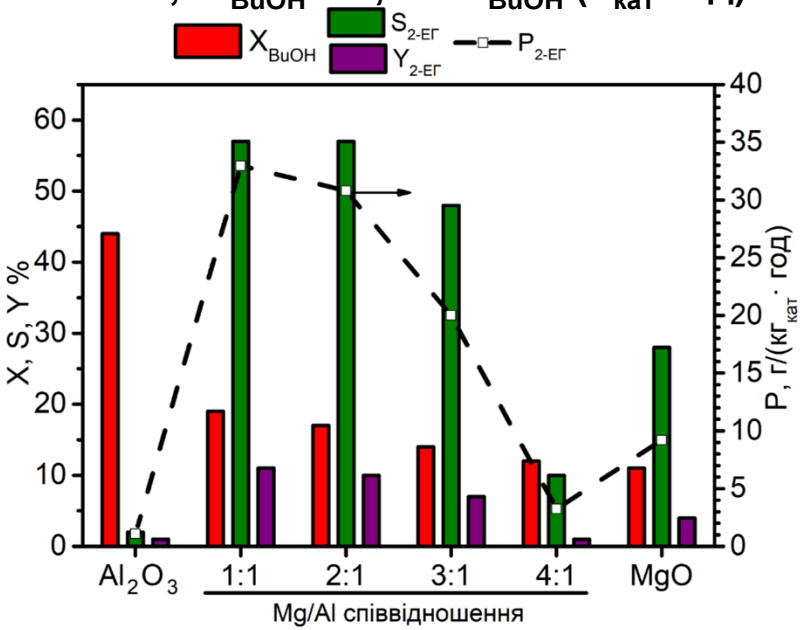


Каталізатор $MgO-Al_2O_3$ (2:1)

X_{EtOH}= 27%, S_{BuOH}= 65%, Y_{BuOH}= 17,5%

$S_Σ$ = 87%, $Y_Σ$ = 23,5%

t = 300 °C; W_{BuOH} = 0,250 $л_{BuOH}/(л_{кат}·год)$



Каталізатор $MgO-Al_2O_3$ (1:1)

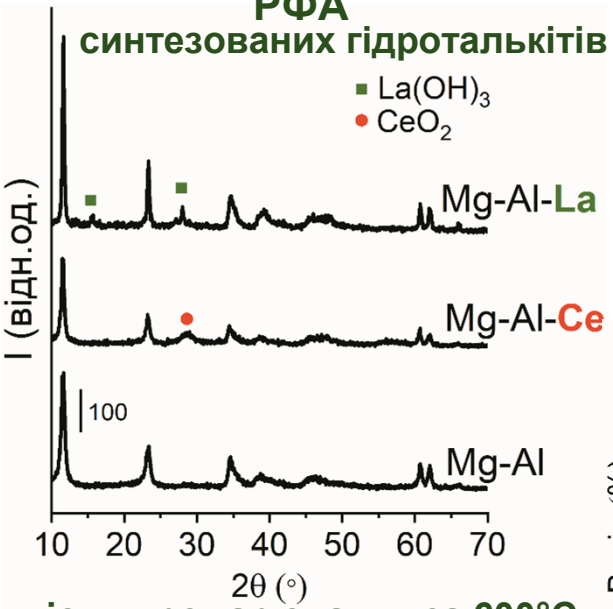
X_{EtOH}= 19%, S_{2-EH}= 57%, Y_{2-EH} = 10,8%

Найбільший вихід BuOH та 2-EH досягається в присутності каталізаторів $MgO–Al_2O_3$ зі співвідношенням Mg/Al = 1÷2 та C_a/C_b = 1,9÷2,9.

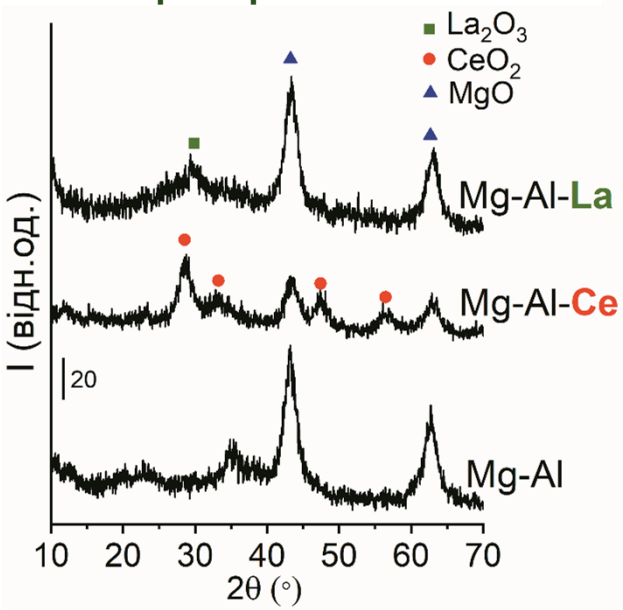
Σ – всі утворені спирти: 1-бутанол, 2-етил-1-бутанол, 1-гексанол, 2-етил-1-гексанол, 1-октанол.

Вплив модифікуючих добавок на каталітичні властивості $MgO-Al_2O_3$ систем в процесі газофазного перетворення етанолу в 1-бутанол

РФА синтезованих гідротальків

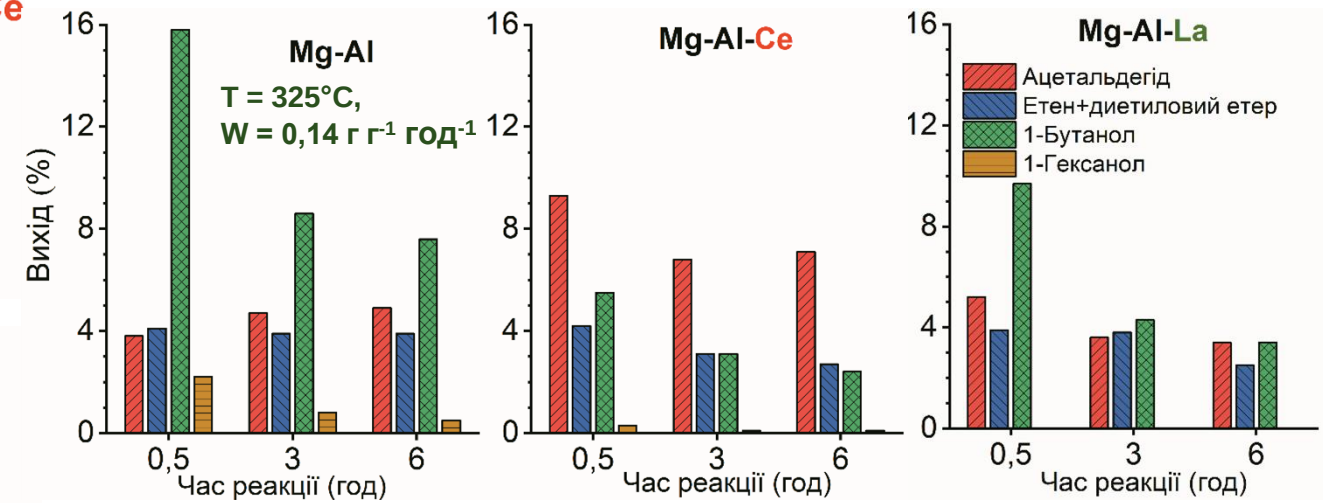


після прожарювання за 600°C



ТПД NH_3 та CO_2

Каталізатор	Кислотність C_a, відн.од.	Основність C_b, відн.од.	C_a/C_b
Mg-Al	1,1	2,5	2,2
Mg-Al-Ce	1,7	2,8	1,6
Mg-Al-La	1,5	2,8	1,9

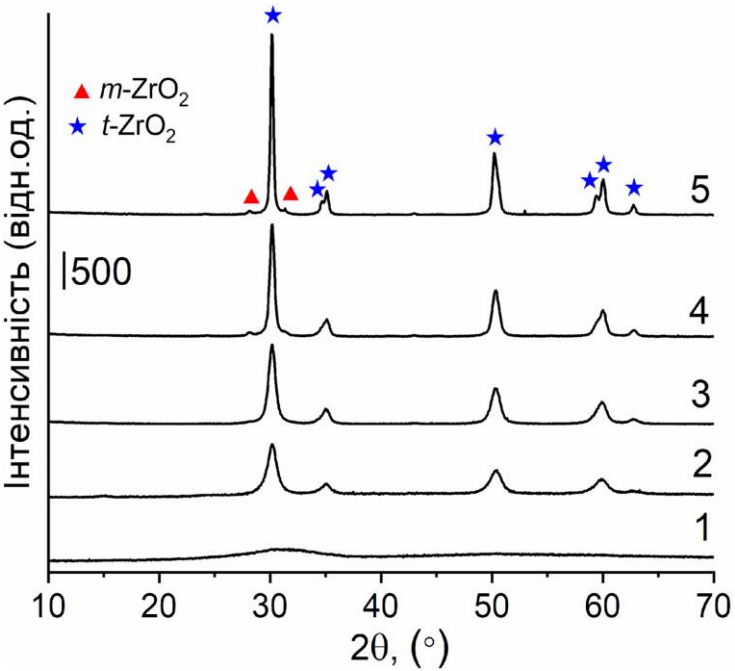


- **Допування $MgO-Al_2O_3$ оксидами лантану та церію сприяє збільшенню кількості активних центрів реакції дегідрування етанолу до ацетальдегіду.**

К.В. Валігура, О.В. Ларіна та ін. Теорет. та експерим. хімія. 56 (2020) 373
O.V. Larina et al. Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis. 132 (2021) 359

Вплив модифікуючої добавки Y_2O_3 на каталітичні властивості систем на основі ZrO_2 в процесі перетворення EtOH → BuOH

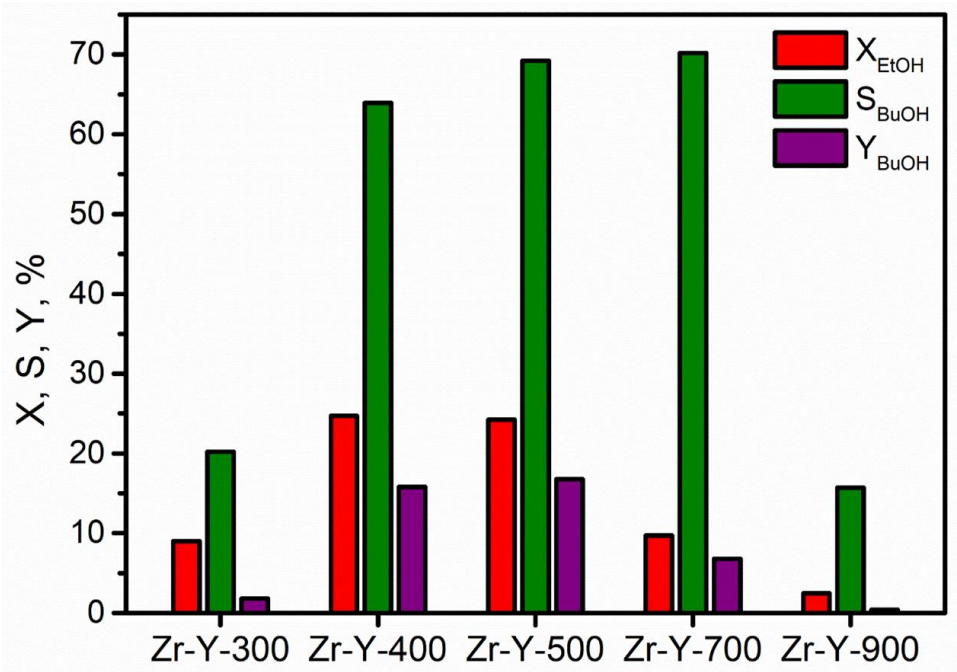
РФА



КР-ТД NH_3 та CO_2

Каталізатор ZrO_2-Y_2O_3	Кислотність C_a, ммоль NH_3/г	T_{NH3}, °C	Основність C_b, ммоль CO_2/г	T_{CO2}, °C
1 – Zr-Y-300	0,46	180	0,41	225
2 – Zr-Y-400	0,42	170	0,23	200
3 – Zr-Y-500	0,27	150	0,42	325
4 – Zr-Y-700	0,14	250	0,12	250
5 – Zr-Y-900	0,07	200	0,08	150

t = 300 °C; W_{EtOH} = 0,2 $л_{EtOH}/(л_{кат}·год)$



Стабілізація тетрагональної фази ZrO_2 добавкою Y_2O_3 та регулювання температури прожарювання каталізатора (оптимум за 500°C) сприяє збільшенню концентрації основних центрів на поверхні.

Каталізатор ZrO_2-3,4%Y_2O_3

X_{EtOH}= 24%, S_{BuOH}= 69%, Y_{BuOH}= 16,8%

N.V. Vlasenko, P.I. Kyriienko, K.V. Valihura et al. ACS Omega. 4 (2019) 21469–21476

Зміна концентрації в шарі каталізатора в часі = швидкість дифузії + швидкість реакції

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + f(C)$$

У цеолітах – single file дифузія

$$\frac{\partial^{\frac{1}{2}} C}{\partial t^{\frac{1}{2}}} = D_a \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Підвищення продуктивності процесу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \Uparrow \rightarrow f(C) \Uparrow \rightarrow \mathrm{T} \Uparrow$$

$$D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \Uparrow \rightarrow \mathrm{D} \Uparrow$$

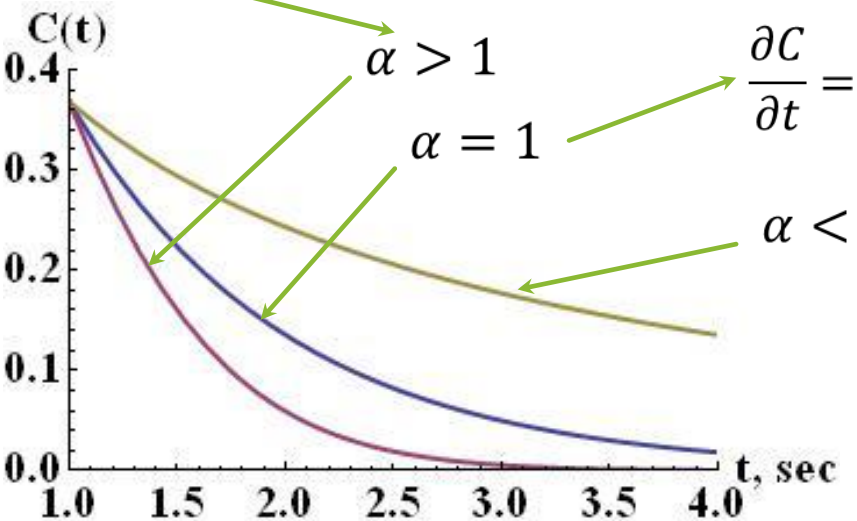
$$\frac{\partial^\alpha C}{\partial t^\alpha} = D_a \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$\alpha > 1$

$\alpha = 1$

$\alpha < 1$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$



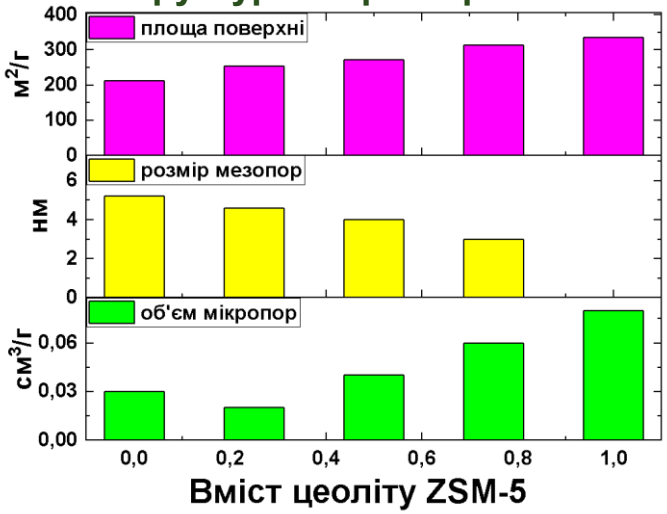
Конверсія метанолу на H-ZSM-5/Al_2O_3 каталізаторах

Переваги процесу:

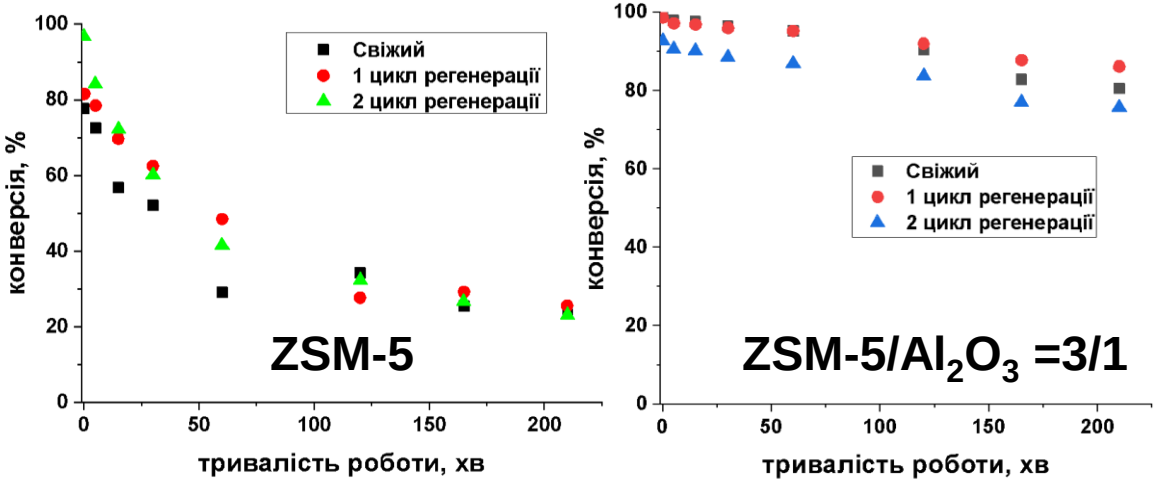
1. Синтез олефінів із сировини не нафтового походження.
2. Сировина – біомаса та C_1 речовини (вугілля та природний газ).
3. Високий ступінь конверсії метанолу.
4. Високий вихід C_2-C_4 олефінів.

Нанокомпозитні каталізатори перетворення метанолу ZSM-5/Al_2O_3

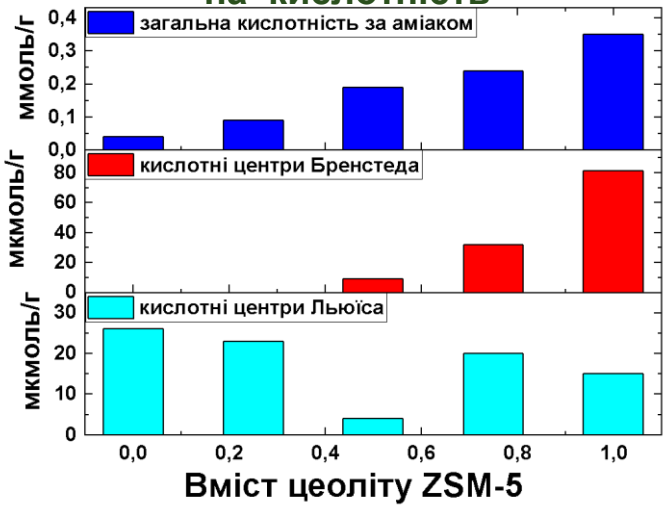
Вплив складу каталізатора на його структурні характеристики

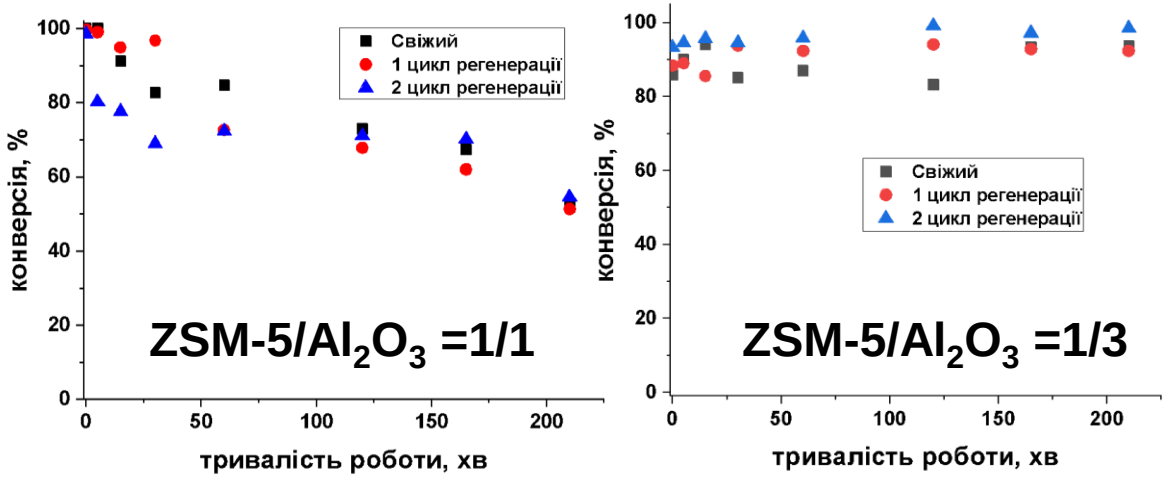


Каталітична активність у реакції перетворення метанолу



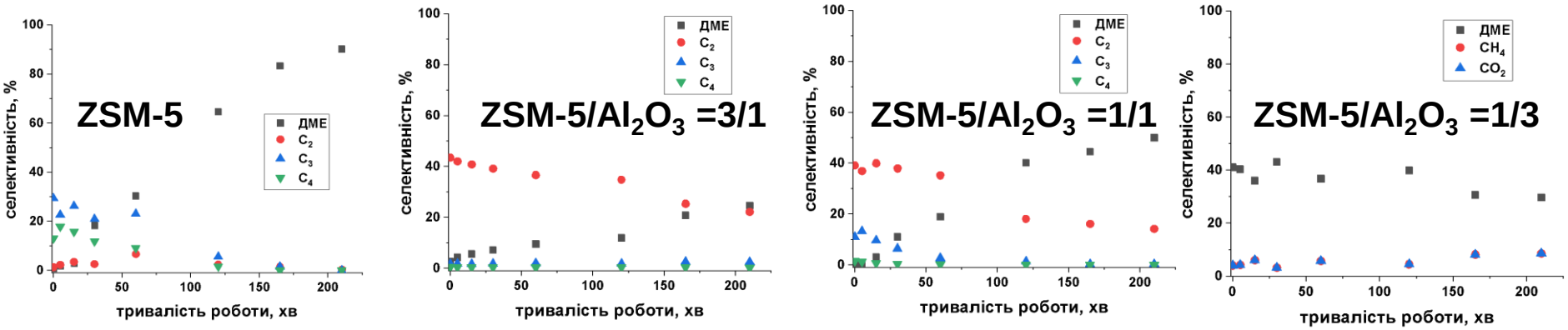
Вплив складу каталізатора на кислотність





Розроблені каталізатори демонструють високу стабільність роботи та здатність до регенерації.

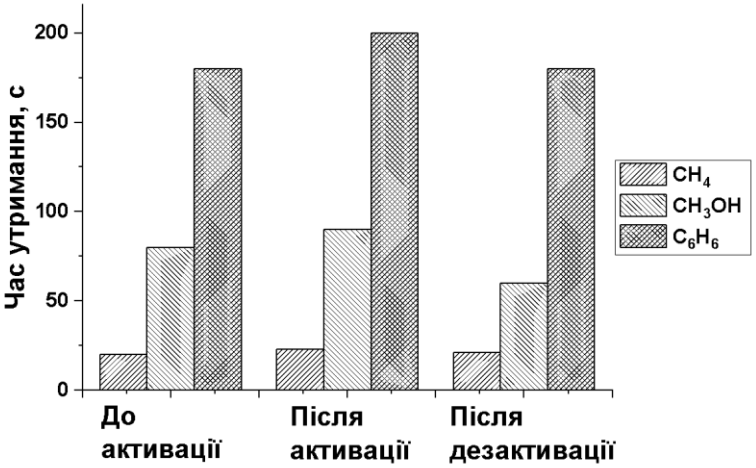
Синтез вуглеводнів із метанолу на каталізаторах ZSM-5/Al_2O_3



Розроблені каталізатори характеризуються селективністю за етиленом понад 40% та високою тривалістю роботи за рахунок зниження сили кислотних центрів та прискорення транспорту реагентів у зерні каталізатора.

Вплив (дез)активації каталізатора на текстурні властивості та час утримання реагентів

Каталізатор	Після активації	Після дезактивації	До активації
Питома площа поверхні, $м^2/г$	272	206	263
Розмір мікропор, нм	0,9	0,9	0,9
Розмір мезопор, нм	3,9	4,0	4,0
Об'єм пор, $см^3/г$	0,22	0,20	0,22
Об'єм мікропор, $см^3/г$	0,04	0,02	0,04



Вплив кінетичного діаметру молекули дифузанту та теплоти адсорбції молекули дифузату на індивідуальних складових каталізатора на режим транспорту у зерні каталізатора

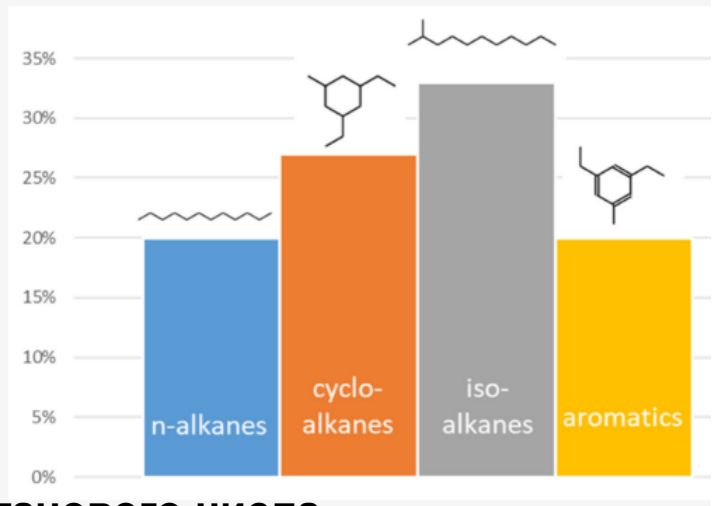
Дифузат	Кінетичний діаметр, нм	Енергія адсорбції, кДж/моль		Режим дифузії
		ZSM-5	Al_2O_3	
Метан	0,38	25	20	Фіківський
Метанол	0,41	65–120	94	Аномальний
Ізопропанол	0,47	125	89–121	Аномальний
н-Гексан	0,43	71–90	32–35	Аномальний
Бензол	0,59	80	42–45	Фіківський
Циклогексан	0,60	63	34	Фіківський
Циклогексанол	0,60	30	121	Фіківський

Режим дифузії у зерні каталізатора є аномальним лише в тому випадку, якщо виконуються такі умови: (i) кінетичний діаметр молекули є меншим за розмір мікропор цеоліту ZSM-5 (0,56 нм), (ii) теплота адсорбції дифузату на індивідуальних складових каталізатора перевищує значення близько 40–45 кДж/моль. Таким чином, критерієм виникнення аномальної дифузії є здатність молекули проникати до мікропор твердого тіла та адсорбуватися з високою теплотою адсорбції.

Продукти ізомеризації алканів - високооктанові добавки палив

Сполука	Октаове число		Антидетонаційний індекс АКІ = (RON+MON)/2
	дослідний метод (RON)	моторний метод (MON)	
н-пентан	62	62	62
ізо-пентан		90	
н-гексан	25	26.0	26
*метил*пентани	73-75	74-77	74-76
*диметил*бутани		93-95	
циклогексан	84		
бензен	101		
толуен	121	107	114

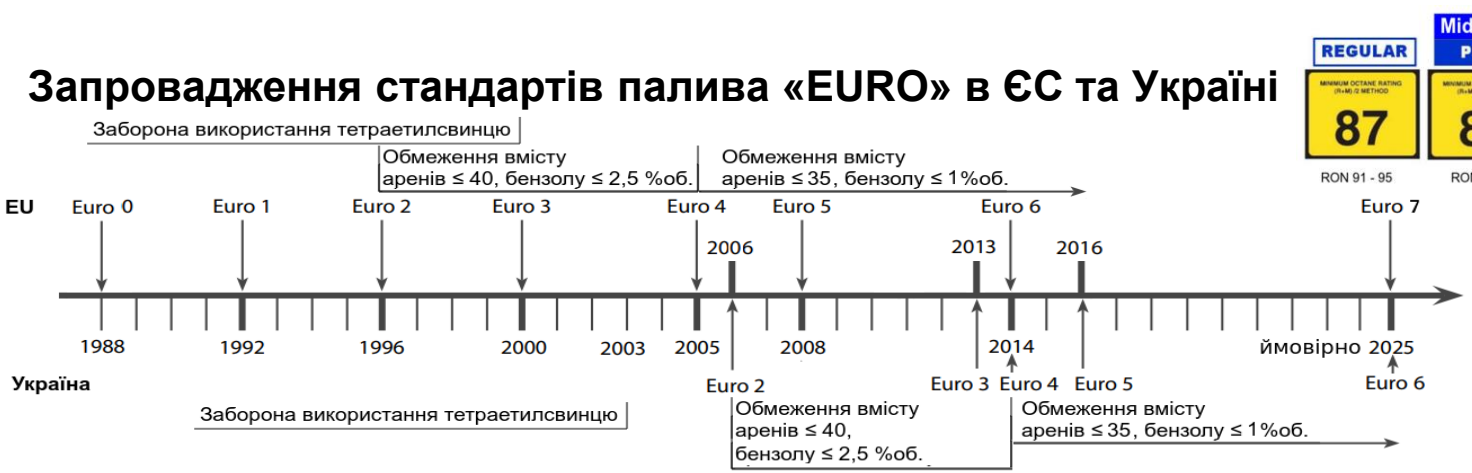
Склад бензину

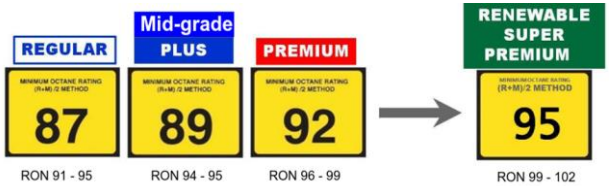


Класи палив у різних країнах залежно від октанового числа

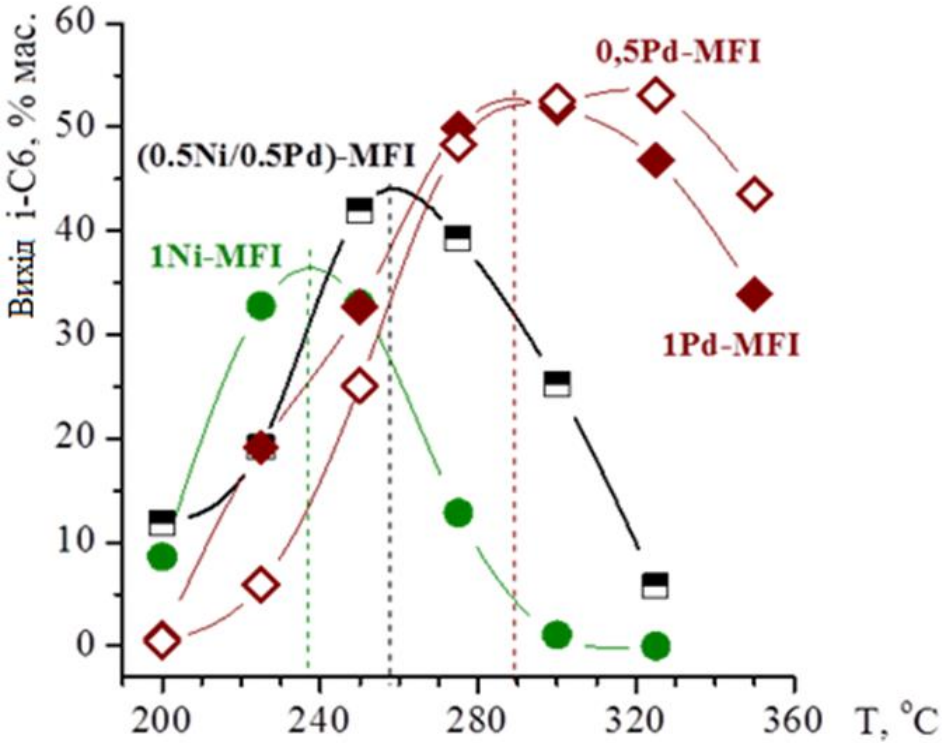
RON	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
Scandinavian					Regular			Premium				
UK					Regular			Premium	Super			High-performance
USA	Regular			Mid-grade		Premium						

Запровадження стандартів палива «EURO» в ЄС та Україні

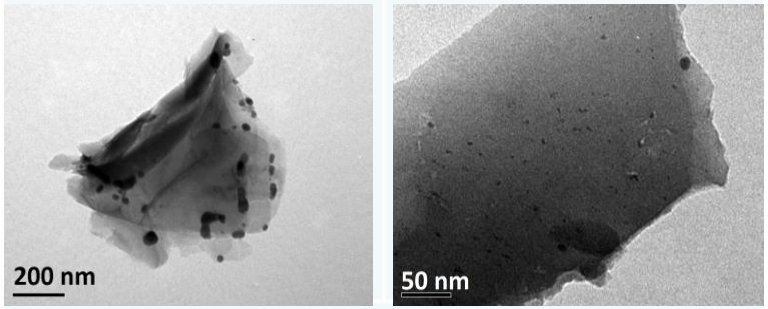




Ізомеризація *н*-гексану на біфункціональних цеолітах



Зразки цеоліту MFI (Pd 0,5 % мас.)



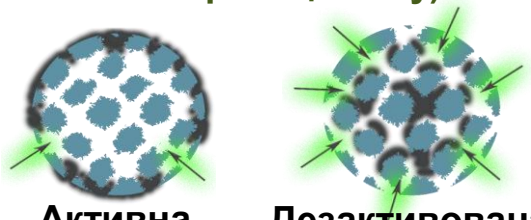
Розмір частинок D, нм	
20–35	9
Вихід продуктів ізомеризації, % мас.	
35,9	52,5

Одержано високоселективні (86-97 %) цеолітні каталізатори ізомеризації лінійних вуглеводнів на основі HMFI:

- **– Ni-вмісний, за ефективністю наближений до Pd-вмісного з такою ж кількістю металічної компоненти (виходи ізомерів гексану за мікроімпульсних умов тестування – 33 % мас. за 225 °C і 50-52 % за 275-300 °C відповідно);**
- **– Pd-вмісні із вдвічі нижчим вмістом металу (0,5 % мас.), які зберігають високий вихід ізомерів – 48-52,5 % мас. за 275-300 °C (монометалічний) і 42 % мас. за 250 °C (біметалічний);**
- **– біметалічний каталізатор (по 0,5 % мас. Pd і Ni), який демонструє 42 % вихід ізомерів гексану за 250 °C за 45 % конверсії.**

Вплив модифікування зовнішньої поверхні

Зовнішня поверхня (3-10% загальної поверхні цеоліту)



Причини зниження активності цеолітних каталізаторів:

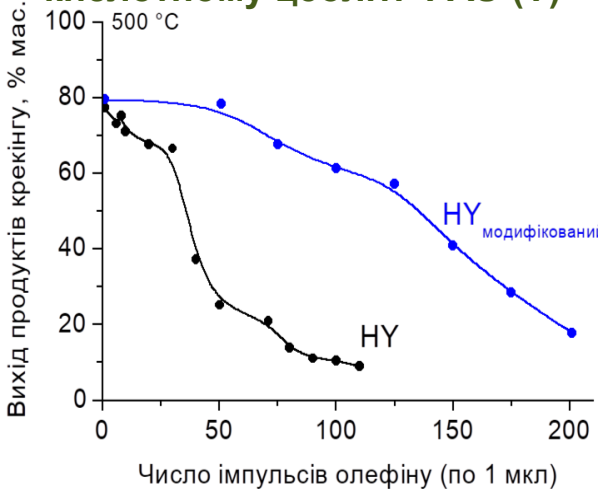
Кислотні:

олефін → карбокатіон → кокс

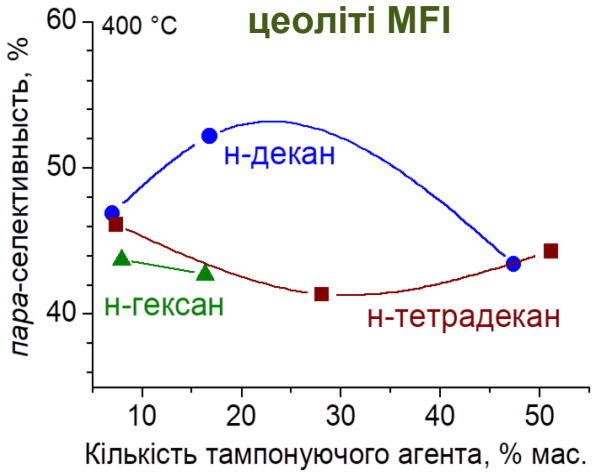
Основні:

- **отруєння центрів,**
- **утворення коксу на залишкових кислотних центрах Бренстеда (БКЦ).**

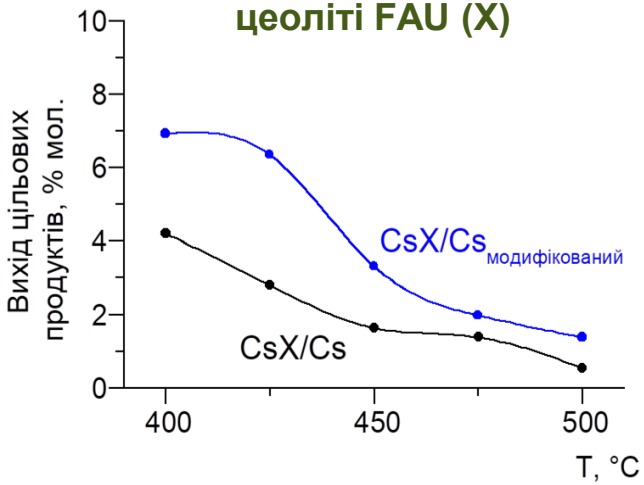
Крекінг олефіну на кислотному цеоліті FAU (Y)



Пара-диспропорціонування толуолу на кислотному цеоліті MFI



Алкілування толуолу метанолом на основному цеоліті FAU (X)



Вперше показано, що модифікування зовнішньої поверхні цеолітних мікрокристалів деалюмінуючими агентами сприяє подовженню стабільної роботи каталізаторів на основі цеоліту FAU в реакції крекінгу, а також в алкілуванні толуолу метанолом у бічний ланцюг з пригніченням утворення побічних продуктів у цій реакції. Знайдено ефективний тампонуючий агент, застосування якого при модифікуванні гексафторсилікатом амонію цеоліту MFI мало наслідком підвищення у 1,5 раза його *пара*-селективності у диспропорціонуванні толуолу.

Основні результати роботи

1. З'ясовано природу дезактивуючої дії води на процес перетворення етанолу в 1,3-бутадієн у присутності оксидних Zn-Zr(La)-Si та цеолітних Cu(Ag, Zn)/Ta/SiBEA каталізаторів. За даними *in situ* ІЧ-спектроскопії з етанолом та ацетоном як молекул-зондів встановлено, що зниження конверсії етанолу та селективності за 1,3-бутадієном у присутності води відбувається внаслідок блокування частини центрів альдольної конденсації ацетальдегіду – ключової реакції ЕТВ-процесу. Визначено шляхи створення нових поліфункціональних каталізаторів, толерантних до дії води, які можуть бути використані для ефективної переробки біоетанолу в цінні органічні продукти.

2. Встановлено, що характеристики пористої структури ZnLaZrSi-оксидних систем, сформованих на основі кремнеземів різних типів та деалюмінованого цеоліту структури BEA, не є критичними параметрами для досягнення високих селективності та виходу 1,3-бутадієну. Активність та селективність каталізаторів залежать від кислотно-основних властивостей їх поверхні, які визначаються природою кремнеземвмісного компоненту. Найвищі значення селективності за 1,3-бутадієном досягаються за участю каталізаторів на основі силікагелю КСКГ (65–68%) та SBA-15 (63%).

3. Показано, що спосіб введення ZnO та його кислотно-основні характеристики суттєвим чином впливають на каталітичні властивості композиції ZnO/ZrO_2-SiO_2, яка є однією з найбільш активних в процесі перетворення як етанолу, так і етанол-водних сумішей в 1,3-бутадієн. Найбільш активними каталізаторами є системи, приготовані методом мокрого змішування компонентів з наступною термічною обробкою. Виявлено, що модифікування ZnZrSi-оксидних систем сполуками лантану (La_xO_y) сприяє підвищенню селективності за 1,3-бутадієном в ЕТВ-процесі в присутності води в реакційній суміші, що обумовлено формуванням додаткових основних центрів за участю катіонів лантану.

4. З'ясовано, що Mg-Al-оксидні каталізатори, отримані шляхом розкладання гідротальककітів, у процесах перетворення етанолу та 1-бутанолу у проточній системі перевищують за продуктивністю індивідуальні оксиди (MgO, Al_2O_3), що обумовлено утворенням кислотно-основних пар Mg-O-Al в зоні контакту оксидних фаз магнію та алюмінію (в процесі прожарювання гідротальककітів). Оптимальне співвідношення кислотних/основних центрів на поверхні каталізатора визначається співвідношенням Mg/Al та становить: для процесу перетворення етанол → 1-бутанол – 1,9, для процесу перетворення 1-бутанол → 2-етил-1-гексанол – 2,9. Найбільший вихід 1-бутанолу (18 % із селективністю 65 %) досягнуто у присутності каталізатора із співвідношенням Mg/Al = 2, тоді як для 2-етил-1-гексанолу (вихід 11 % із селективністю 57 %) досягнуто на каталізаторі зі співвідношенням Mg/Al = 1.

Основні результати роботи

5. З'ясовано, що допування композицій $MgO-Al_2O_3$ (похідних гідроталькітів) катіонами La^{3+} та Ce^{3+} на стадії синтезу гідроталькітів зумовлює збільшення загальної концентрації кислотних та основних центрів на поверхні каталізаторів та сприяє зростанню швидкості утворення ацетальдегіду на першій стадії процесу перетворення етанолу в 1-бутанол. Збільшення співвідношення концентрацій основних та кислотних центрів поверхні сприяє підвищенню продуктивності каталізатора за 1-бутанолом. Визначено, що добавки CeO_2, Y_2O_3 впливають на тип кристалічної ґратки ZrO_2 у складі оксидної композиції, що визначає кислотно-основні властивості поверхні. В результаті стабілізації тетрагональної фази ZrO_2 добавками CeO_2 та Y_2O_3 відбувається збільшення концентрації основних центрів на поверхні каталізаторів, що зумовлює підвищення селективності утворення 1-бутанолу з етанолу в їх присутності. На каталізаторі ZrO_2-Y_2O_3 досягаються високі значення селективності утворення (до 70 %) та виходу 1-бутанолу (17 %).

6. Розроблено ряд нових каталізаторів на основі цеоліту структурного типу MFI та оксиду алюмінію, які характеризуються високою активністю у процесі синтезу етилену та пропілену з метанолу. Створені каталізатори демонструють підвищену продуктивність та тривалість роботи порівняно із існуючими аналогами. Покращення експлуатаційних властивостей каталізаторів досягнуто шляхом регулювання сили активних кислотних центрів поверхні, а також за рахунок реалізації аномально швидкого транспорту реагентів у зерні каталізатора.

7. Встановлено критерії виникнення аномального транспорту реагенту у зерні каталізатора. Зокрема аномальний режим транспорту має місце за теплоти адсорбції реагенту у мікропорах каталізатора більшої ніж 40–45 кДж/моль. За таких значень теплоти адсорбції тривалість "стрибків" молекул на поверхні твердого тіла характеризується степеневим розподілом нецілого порядку. Встановлено, що завуглецювання поверхні не впливає на аномальний режим транспорту реагентів у зерні каталізатора.

8. Базуючись на результатах дослідження Ni- та Pd-вмісних біфункціональних каталізаторів на основі цеоліту структурного типу MFI в ізомеризації н-гексану показано перевагу таких, які містять дисперговані наночастинки металу розміром 3–7 нм. Одержано Ni-вмісний каталізатор на основі цеоліту структурного типу MFI, за ефективністю наближений до Pd-вмісного з такою ж кількістю металічної компоненти. Встановлено, що на модифікованих методом іонного обміну Ni-вмісних цеолітах утворені малі частинки металу, що локалізуються безпосередньо біля кислотних центрів Бренстеда, сприяють суттєвому збільшенню сили таких центрів і, як наслідок, зниженню температури реакції ізомеризації разом із посиленням крекінгу (на відміну від Pd-вмісних зразків). Для біметалічних каталізаторів визначено роль кожного з металів у процесі перетворення лінійного гексану в ізомери.

9. Встановлено негативний вплив активних центрів зовнішньої поверхні на стабільність роботи кислотного і основнóго каталізаторів (крекінгу і метилування в бічний ланцюг відповідно). Вперше запропоновано спосіб модифікування каталізатора деалюмінуючим агентом для зниження зовнішньоповерхневого завуглецювання і підвищення селективності цільового процесу за рахунок пригнічення утворення побічних продуктів. Виявлено ключові фактори дезактивації оснóвного каталізатора алкілування толуолу метанолом та запропоновано механізм його завуглецювання.

Публікації та наукометричні показники

Кількість публікацій за роботою: 81

- 1 глава в монографії (видана за кордоном);
- 43 наукові статті (31 – у англомовних журналах з імпакт-фактором);
- тези 33 доповідей на вітчизняних і міжнародних конференціях;
- 4 патенти України на корисну модель.

Загальна **кількість посилань на публікації авторів/h-індекс роботи**, згідно баз даних складає відповідно:

Web of Science – 143/7, **Scopus – 168/9**, **Google Scholar – 202/9**.

Загальні дані про авторів роботи

Ольга Вікторівна Ларіна – опублікувала 2 глави в монографіях (1 за кордоном), 31 статтю (29 в англомовних журналах з імпакт-фактором); отримала 6 патентів України на корисну модель; h-індекс (Scopus) – 12.

Каріна Віталіївна Валігура – опублікувала 11 статей (10 в англомовних журналах з імпакт-фактором); отримала 3 патенти України на корисну модель; h-індекс (Scopus) – 4.

Олексій Олексійович Жох – опублікував 37 статей (34 в англомовних журналах з імпакт-фактором); отримав 1 патент України на корисну модель; h-індекс (Scopus) – 7.

Олександра Петрівна Пертко – опублікувала 22 статті (13 в англомовних журналах з імпакт-фактором); отримала 1 патент України на корисну модель; h-індекс (Scopus) – 3.

Дякуємо за увагу!