

## HYDROGENATION OF POLY- $\alpha$ -OLEFINIC COMPOUNDS OVER PALLADIUM AND PALLADIUM-NICKEL CATALYSTS

**К. Toshtay**

*Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

*E-mail: [kainaubek.toshtay@gmail.com](mailto:kainaubek.toshtay@gmail.com)*

**Abstract.** *Introduction.* Poly- $\alpha$ -olefinic compounds are a component of base oils obtained by catalytic polymerization of linear  $\alpha$ -olefins with subsequent hydrogenation, used for aviation and ground technology, and occupy an important place in the industry. Products of oligomerization contain one double bond; which needs to be hydrogenated to make it resistant to various chemical transformations during the production of lubricating oils. *Methodology.* Hydrogenation was carried out in an autoclave, which allows maintaining a constant temperature and pressure of hydrogen with measurement of the volume of absorbed hydrogen, excluding external diffusion inhibition. Catalysts were characterized by the following methods: specific surface area by BET, and particle size by transmission electron microscopy. The product of the reaction was characterized by the following methods: density, bromine number, IR, kinematic viscosity, and freezing point. *Results and discussion.* For the hydrogenation of poly- $\alpha$ -olefinic compounds, 0.5–1.0% Pd catalysts applied to modified natural diatomite clay are proposed. It is shown that modification with additional nickel leads to a decrease in activity. *Conclusion.* It has been found that palladium catalysts carry out the process under milder conditions, exhibit higher activity compared to nickel catalysts, significantly reduce the process time, and provide a higher degree of hydrogenation. The activity of bimetallic catalysts is lower than that of palladium catalysts. The physicochemical characteristics of polyalphaolefin oils have been determined.

It has been found that palladium catalysts carry out the process in milder conditions, show higher activity compared to nickel catalysts, significantly reduce the process time, and provide a higher degree of hydrogenation. The activity of bimetallic catalysts is lower than that of palladium catalysts.

**Keywords:** hydrogenation, palladium, nickel, diatomite, the catalyst, poly- $\alpha$ -olefin oils, activity, bimetallic catalyst, bromine number, kinematic viscosity, freezing point

---

*Toshtay*                      *PhD, Senior Lecturer. E-mail: [kainaubek.toshtay@gmail.com](mailto:kainaubek.toshtay@gmail.com);*  
*Kainaubek*                      *<https://orcid.org/0000-0003-1182-7460>*

---

### ПАЛЛАДИЙ ЖӘНЕ ПАЛЛАДИЙ-НИКЕЛЬ КАТАЛИЗАТОРЛАРЫНДА ПОЛИ- $\alpha$ - ОЛЕФИН ҚОСЫЛЫСТАРЫН ГИДРЛЕУ

**К. Тоштай**

*Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан*

*E-mail: [kainaubek.toshtay@gmail.com](mailto:kainaubek.toshtay@gmail.com)*

**Түйіндемe.** *Кіріспе.* Поли- $\alpha$ -олефинді қосылыстар сызықты альфа-олефиндердің каталитикалық полимерленуінен кейін гидрлеу нәтижесінде алынған негізгі майлардың құрамдас бөлігі, авиациялық және жерүсті техникасы үшін пайдаланылады және өнеркәсіпте маңызды орын алады. Олигомеризация өнімдерінде бір қос байланыс бар; майлау майларын өндіру кезінде әртүрлі

---

**Citation:** Toshtay K. Hydrogenation of poly- $\alpha$ -olefin oils over palladium and palladium-nickel catalyst. *Chem. J. Kaz.*, 2023, 3(83), 28-36. (In Kaz.). DOI: <https://doi.org/10.51580/2023-3.2710-1185.25>

химиялық өзгерістерге төзімділік беру үшін гидрленуі қажет. *Әдістеме.* Гидрлеу процесі автоклавта жүргізілді, бұл сыртқы диффузияның тежелуін болдырмай, сіңірілген сутегі көлемін өлшей отырып, сутегінің тұрақты температурасы мен қысымын сақтауға мүмкіндік берді. Дайындалған катализаторлардың меншікті бетінің ауданы BET әдісімен, трансмиссиялық электронды микроскоп арқылы бөлшектердің өлшемдері анықталды. Сондай-ақ полиальфаолефиндік майлардың және реакция өнімдерінің тығыздығы, бром саны, инфрақызыл спектроскопиясы және кинематикалық тұтқырлығы анықталды. *Нәтижелер және талқылау.* Поли- $\alpha$ -олефинді қосылыстарын гидрлеу реакциясында модификацияланған табиғи саз диатомитіне отырғызылған 0.5-1.0% Pd катализаторлары жасалды. Оларды никель қоспаларымен өзгерту активтіліктің төмендеуіне әкелетіні көрсетілді. *Қорытынды.* Палладий катализаторлары никель катализаторларымен салыстырғанда процесі неғұрлым жұмсақ жағдайда жүргізетіні, жоғары активтілік көрсететіні, процесс уақытын едәуір қысқартып, гидрлеудің жоғары дәрежесін қамтамасыз ететіні анықталды. Сонымен қатар, биметалл катализаторларының активтілігі палладий катализаторларына қарағанда төмен болып келеді.

**Кілт сөздер:** гидрлеу, палладий, никель, диатомит, катализатор, поли- $\alpha$ -олефин майлары, активтілік, биметалдық катализатор, бром саны, кинематикалық тұтқырлық, кату температурасы

---

*Тоштай Қайнаубек*

*PhD*

---

## 1. Кіріспе

$\alpha$ -олефиндер негізінде жасалған синтетикалық майлар негізінен әмбебап автомобиль, барлық маусымдық мотор және трансмиссиондық майларын, гидравликалық сұйықтықтарды өндіру үшін, сондай-ақ тоңазытқыштарға, компрессорларға және жоғары температурада ауыр жүктемемен жұмыс істейтін басқа қондырғыларға арналған өнеркәсіптік май ретінде қолданылады. Олар қуатты дизельді орташа жылдамдықты қозғалтқыштар және тепловоздар үшін мотор майы ретінде де қолданылады [1,2].

Поли- $\alpha$ -олефин майлары (ПАОМ) синтез процесінде олигомерлердің молекулалық салмағын және олардың молекулалық-массалық таралуын реттей отырып, әртүрлі біртекті және гетерогенді қышқыл катализаторларында жоғары  $\alpha$ -олефиндердің (мысалы, децен-1) олигомерленуі арқылы алынады [3-6].  $\alpha$ -олефиндердің олигомеризация өнімдерінде қанықпаған қос байланыстар бар, сондықтан олардың құрамындағы қос байланыстарды қанықтыру және тотығуға қарсы тұрақтылыққа қол жеткізу үшін гидрлеу процесі арқылы қол жеткізіледі [7,8]. ПАОМ -ды гидрлеу туралы қолжетімді әдебиеттер өте аз. Қазіргі уақытта ПАОМ- ды гидрлеу өнеркәсіптік жағдайларда жеткілікті жоғары активтілікке ие жоғары пайыздық дисперсті никель катализаторларда жүзеге асырылады. Тәжірибе көрсеткендей, олигомерлерді осы катализаторларда 260 °C-қа дейінгі температурада және 3 МПа-ға дейінгі қысымда гидрлеу кезінде олардың изомерленуі жүреді, бұл алынған өнімнің қасиеттеріне айтарлықтай әсер етеді. Атап айтқанда, кристалдану температурасы айтарлықтай жоғарылайды және алынған синтетикалық майларды одан әрі пайдалану шектеледі [9, 10]. Зерттеушілер синтетикалық майлардың гидрлеу процесінің жылдамдығын арттыру үшін катализатор ретінде әртүрлі металдарды, негізінен асыл металдарды пайдаланды. ПАОМ гидрлеу

процесінде палладий катализаторларын қолдану жеңіл жағдайларда гидрлеу процесін жүргізуге мүмкіндік береді [11-13].

Осы жұмыста активтендірілген диатомитке отырғызылған монометалдық Pd (0,5 және 1,0%) және биметалдық катализаторларды (1.0% Pd – 0.3% Ni және 1.0% Pd – 0.8% Ni) қолдана отырып, ПАО-4 ("ТАНЕКО", Нижнекамск қ., Татарстан Республикасы, Ресей) гидрлеу бойынша зерттеулер жүргізілді. Катализаторлар мен поли- $\alpha$ -олефин майларының физика-химиялық сипаттамалары, катализаторлардың активтілігі, сондай-ақ алынған өнімдердің гидрлену дәрежесі анықталды.

## 2. Экперименталды бөлім

### 2.1 Катализаторларды жасау әдісі

Монометалдық катализаторлар (0.5% Pd және 1.0% Pd/D) тасымалдаушыға адсорбция әдісімен PdCl<sub>2</sub> қолдану арқылы алынды (Активтелген диатомит-D). Биметаллды 1.0% Pd – 0.3% Ni және 1.0% Pd – 0.8% Ni/D катализаторлары белсендірілген диатомитке палладий мен никель хлоридтерін бірге адсорбциялау әдісімен дайындалды. Адсорбциядан кейін катализаторлар тазартылған сумен жуылып, 120 °C температурада 2 сағат бойы кептірілді.

### 2.2 Катализаторлар мен поли- $\alpha$ -олефин майларының физика-химиялық сипаттамалары.

Катализаторлардың дифрактограммалары D8 Advance A25 (Bruker) дифрактометрінде түсірілді. Жалпы меншікті беттік ауданы БЭТ әдісімен ASAP 2020 Micrometrics қондырғысында 77K-де жүргізілді. Катализаторлардың морфологиясы JEM-2010 электронды микроскопында ("JEOL", Жапония) зерттелді. ПАО және ПАОМ үлгілерінің инфрақызыл спектрлері 4 см<sup>-1</sup> сканерлеу қадамымен 400-4000 см<sup>-1</sup> диапазонында Perkin Elmer Spectrum 65 спектрометрінде түсірілді. ПАО мен ПАОМ-дағы C=C қос байланыстарының сандық құрамын сипаттайтын бром саны [14] әдістеме бойынша есептелді. ПАО және ПАОМ кинематикалық тұтқырлығын анықтау ISO 3104:2020 [15], тұтқырлық индексін есептеу ISO 2909:2002 [16] және тығыздығы ISO 1183-1:2019 [17] бойынша жүргізілді.

### 2.3 Каталитикалық гидрлеу

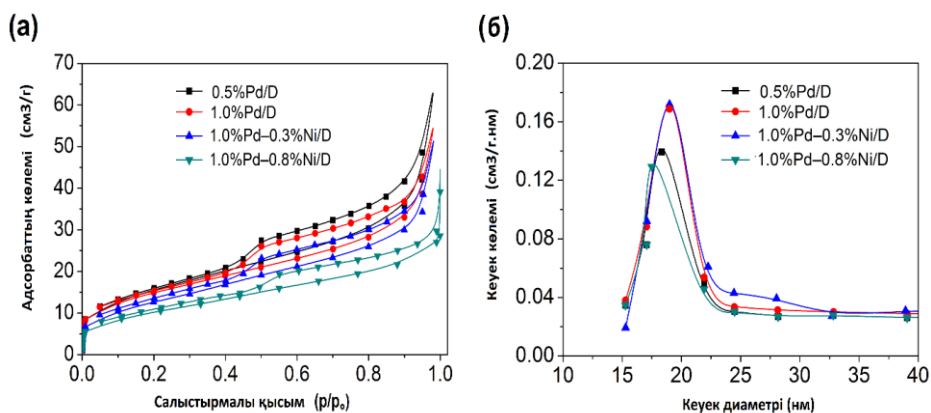
Гидрлеуді ішкі көлемі 100 мл болатын PARR-4848 (АҚШ) жоғары қысымды автоклапта жүргіздік. Реакция жылдамдығы бірлік уақыттағы көлемдік әдіспен өлшенді [18].

## 3. Нәтижелер және оларды талқылау

### 3.1 Катализаторлардың сипаттамасы

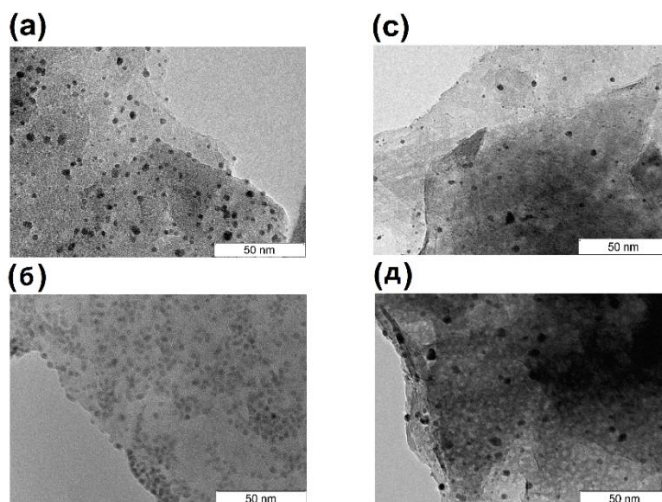
Азоттың адсорбция мен десорбция изотермалары және катализатор үлгілерінің мөлшері бойынша кеуектердің таралуы 1 а және 1 б-суреттерде көрсетілген. 1 а-суретте изотермалардың барлық түрлері IV типке сәйкес келеді, гистерезис ілмектерінің пішіні H<sub>2</sub> типіне жатады және мезокеуектегі газдардың капиллярлық конденсация процесін көрсететін тар, ашық ұштары

бар құбырлы кеуектері бар материалға жатады [20]. Алынған катализаторлардың кеуек диаметрі бойынша таралу қисықтары (сурет. 1 б) бір максимумға ие (12-23 нм). БДХ әдісімен есептелген 0.5% және 1.0% Pd/D катализаторларының кеуектерінің орташа диаметрі 19.0 нм, ал 1.0% Pd – 0.3% Ni/D және 1.0% Pd – 0.8% Ni/D катализаторларының кеуектерінің орташа диаметрі сәйкесінше 18.0 және 17.0 нм құрайды.



Сурет 1 – Дайындалған катализаторлардың адсорбция-десорбция изотермалары (а) және (б) өлшемдері бойынша кеуектердің таралу қисықтары.

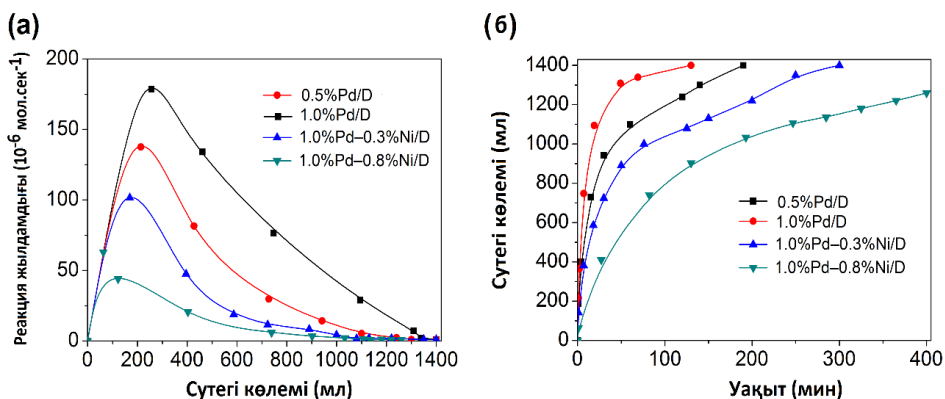
Моно және биметалл катализаторлардың ТЭМ суреттері 2-суретте көрсетілді. 2-суреттен (а және б) палладий бөлшектері тасымалдағыштың бетінде біркелкі орналасқанын көруге болады.



Сурет 2 – Катализаторлардың ТЭМ суреттері. (а) 0.5% Pd/D, (б) 1.0% Pd/D, (с) 1.0% Pd–0.3% Ni/D және (д) 1.0% Pd–0.8% Ni/D

### 3.2. Поли- $\alpha$ -олефин майларын гидрлеу (ПАО-4)

Дайындалған катализаторлар поли- $\alpha$ -олефин майын (ПАО-4) 110 °C температурада және араластыру жылдамдығы 800 айн/мин және сутегінің 1.0 МПа қысымында гидрлеу процесінде сыналды. 3 (а) - суретте реакция жылдамдығының сіңірілген сутегі көлеміне тәуелділік қисықтары және 3 (б) ПАО-4 гидрлеудің кинетикалық қисықтары көрсетілді.



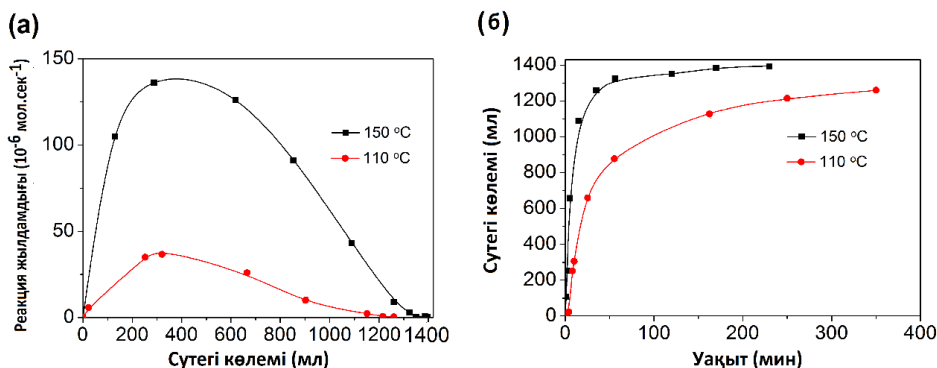
Сурет 3 – Реакция жылдамдығының сіңірілген сутегі көлеміне тәуелділік қисықтары (а) және (б) ПАО-4 гидрлеудің кинетикалық қисықтары.

3 (а) - суретте ПАО-4 гидрлеу процесінде монометалл катализаторларындағы реакция жылдамдығы биметаллға қарағанда жоғары екендігі айқын көрінеді. Сонымен қатар, төмен температурада (110 °C) гидрлеу жылдамдығы катализатордағы палладий мөлшерінің жоғарылауымен айтарлықтай артады (монометалл). 3 (б) - суретте 0.5% Pd/D катализаторында гидрлеу реакциясындағы сутектің жұтылуы 1400 мл – ге жеткен кездегі жұмсалған уақыт 190 минут болса, ал осындай көлемдегі сутектің жұтылуы 1.0% Pd/D катализаторында 130 минутта аяқталады. Керісінше, биметалл катализаторындағы Ni концентрациясының жоғарылауымен (1.0% Pd-0.8% Ni/D) реакция жылдамдығы айтарлықтай төмен және кинетикалық қисық бойымен реакция уақыты (сурет. 3 б) 400 минутқа дейін өседі.

Өндірістегі поли- $\alpha$ -олефиндерді каталитикалық гидрлеу никель катализаторларымен жүзеге асырылады. Әдеби деректерге сәйкес [21, 22] Ni катализаторлары төмен активтіліктен басқа, гидрлеу процесі өте жоғары температура мен қысымда жүреді және процесінің қатаң шарттары гидрлеу өнімінің термиялық бұзылуына әкелуі мүмкін екенін анықтады.

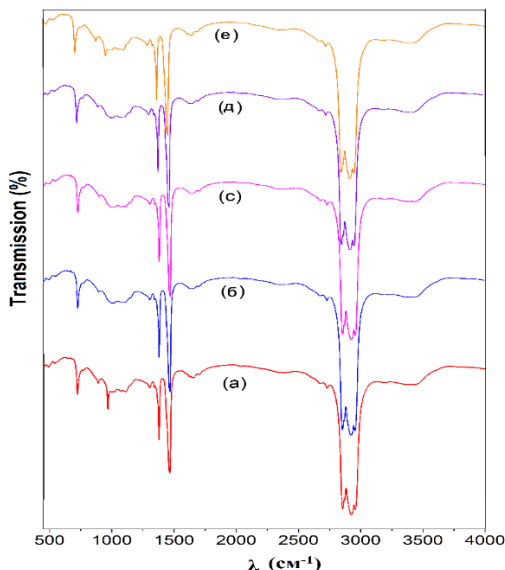
Палладий катализаторларына (1 МПа, 110 және 150 °C) ұқсас жағдайларда ПАО-4 гидрлеу процесінде қолданылған BASF компаниясының никель катализаторының (65% Ni/SiO $_2$ /MgO) активтілігі бойынша жүргізген зерттеулердің нәтижелері төменде 4-суретте келтірілген. 110 °C температурада никель катализаторының активтілігі 1% палладий

катализаторынан 6 есе төмен (сурет.4), сонымен бірге іс жүзінде 0.8% Ni бар биметалл катализаторының активтілігімен сәйкес. Процесс температурасының 150 °C-қа дейін көтерілуі 110 °C кезінде 0.5% Pd катализаторының активтілігімен шамалас келеді.



Сурет 4 – Реакция жылдамдығының сіңірілген сутегі мөлшеріне тәуелділік қисықтары (а) және (б) никель катализаторындағы ПАО-4 гидрлеудің кинетикалық қисықтары.

Бастапқы және 0.5% Pd/D, 1.0% Pd/D, 1.0% Pd - 0.3% Ni/D және 1.0% Pd - 0.8% Ni/D катализаторларымен гидрленген ПАО-4 үлгілерінің ИҚ спектрлері 5-суретте келтірілді.



Сурет 5 – Бастапқы (а) және гидрленген ПАО-4 ИҚ спектрлері (б) 0.5% Pd/D, (с) 1.0% Pd/D, (д) 1.0% Pd–0.3% Ni/D және (е) 1.0% Pd–0.8% Ni/D

Кесте 1 – Бастапқы және гидрленген ПАО-4 физика-химиялық көрсеткіштері

Көрсеткіштер		Гидрлеуге дейін	Гидрлеуден кейін				
			0,5% Pd/D	1,0% Pd/D	1,0%Pd–0,3%Ni/D	1,0%Pd–0,8%Ni/D	Ni катализаторы
Бром саны, г Br <sub>2</sub> /100 г		26	0.2	0.2	0.3	1.97	1.96
Тұтқырлық, мм <sup>2</sup> /сек	100 °C	3.9	4.0	4.1	3.9	3.9	3.9
	40 °C	18.7	19.0	20.0	19.0	18.6	18.9
Тұтқырлық индексі		113	117	118	117	114	115
Қату температурасы, °C		-76	-70	-70	-69	-70	-69

5-суретте (а) бастапқы ПАО-4 ИҚ спектрлерінде 2800-ден 1103 см<sup>-1</sup>-ге дейінгі және 1300-ден 1500 см<sup>-1</sup>-ге дейінгі аймақтағы -CH<sub>3</sub>- және -CH<sub>2</sub>-функционалды топтардағы C-H байланысын сипаттайтын интенсивті сіңіру жолақтарымен бірге, 969 см<sup>-1</sup> әлсіз сіңіру жолақтарында, =CH<sub>2</sub> функционалды топтары анықталды. Осы алынған ИҚ спектрінің деректері басқа жұмыс нәтижелерімен жақсы үйлеседі [23]. Бастапқы ПАО-4 гидрленгеннен (5-сурет б, с және д) кейін, ИҚ спектрінде =CH<sub>2</sub> функционалды топтардағы C-H валенттік деформациялық тербелістердің сіңіру жолақтарын сипаттайтын шырдар жоғалғаны (969 см<sup>-1</sup>) көрінеді. 5-суретте (е) 1.0% Pd – 0.8% Ni/D катализаторымен ПАО-4 гидрленгеннен кейін алынған ИҚ спектрінде қос байланыс толығымен жойылмайтыны анықталды. 1-кестеде бастапқы және гидрленген ПАО-4 майларының физика-химиялық параметрлері көрсетілген.

1-кестеден 0.5% Pd/D, 1.0% Pd/D және 1.0%Pd–0.3%Ni/D катализаторларымен гидрленген өнімдегі бром саны 0.2 г Br<sub>2</sub>/100 г ды құрайды. Ал никель катализаторларында гидрленген ПАО-4 майының бромд сандары биметалдық 1.0%Pd–0.8%Ni катализаторларына жақын және 1.96 г Br<sub>2</sub>/100 г –ды құрайды.

#### 4. Қорытынды

Жасалынған катализатормен поли-α-олефин майларын гидрлеу процесінен төмендегідей қорытынды жасауға болады: ПАО-4 гидрлеу үшін модификацияланған диатомитке отырғызылған 1% палладий катализаторлары ұсынылады, бұл 100% конверсияға әкеледі. Палладийге никель қоспаларын енгізу катализатор белсенділігінің төмендеуіне әкеледі. Ұсынылған палладий катализаторы ПАО-4 майын гидрлеу процесінде, никельге қарағанда төмен температурада жүзеге асырылады. Палладий катализаторларын қайта пайдалануға болады, олар бастапқы активтілікті

сактайды, реакциядан кейін катализаторлардың құрылымы іс жүзінде өзгермейді.

## ГИДРИРОВАНИЕ ПОЛИ- $\alpha$ -ОЛЕФИНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПАЛЛАДИЕВЫХ И ПАЛЛАДИЙ-НИКЕЛЕВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ

**К. Тоштай**

*Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

*E-mail: kainaubek.toshstay@gmail.com*

**Резюме.** *Введение.* Поли- $\alpha$ -олефиновые соединения являются составной частью базовых масел, получаемых каталитической олимеризацией линейных альфа-олефинов с последующим гидрированием, используемых для авиационной и наземной техники, и занимают важное место в индустрии. Продукты олигомеризации содержат одну двойную связь; которую необходимо прогидрировать для придания устойчивости к различным химическим превращениям при производстве смазочных масел. *Методология.* Гидрирование проводили в автоклаве, позволяющем поддерживать постоянную температуру и давление водорода с замером объема поглощаемого водорода, исключая внешне-диффузионное торможение. Используемые катализаторы аттестованы следующими методами: удельная поверхность БЭТ, размеры частиц трансмиссионной электронной микроскопией. Продукты реакции характеризовали следующими методами: плотность, бромное число, ИКС, кинематическая вязкость, температура замерзания. *Результаты и обсуждение.* Для гидрирования поли- $\alpha$ -олефиновых соединений предложены 0,5–1,0 % Pd катализаторы, нанесенные на модифицированную природную глину диатомит. Показано, что модифицирование их добавками никеля приводят к снижению активности. *Заключение.* Установлено, что палладиевые катализаторы проводят процесс в более мягких условиях, проявляют более высокую активность по сравнению с никелевыми катализаторами, значительно сокращают время процесса и обеспечивают более высокую степень гидрирования. Активность биметаллических катализаторов ниже чем у палладиевых катализаторов.

**Ключевые слова:** гидрирование, палладий, никель, диатомит, катализатор, поли- $\alpha$ -олефиновые масла, активность, биметаллический катализатор, бромное число, кинематическая вязкость, температура застывания

---

*Тоштай Қайнаубек*

*PhD*

---

### Әдебиеттер тізімі:

1. Rudnik L.R. Synthetics, Mineral Oils, and Bio-based Lubricants. Chemistry and technology. – Taylor&Francis, 3rd Edition, 2020. – P.636.
2. Patnaik A., Singh T., Kukshal V. Tribology in Materials and Manufacturing: Wear, Friction and Lubrication. – BoD–Books on Demand. 2021. – P.207.
3. Mashayekhi M., Moballegh L., Bahri-Laleh N., Sadjadi S., Poater A. Ionic liquids as modifier for the oligomerization of  $\alpha$ -olefins to reactive poly ( $\alpha$ -olefins) via traditional  $AlCl_3$  catalyst. Mol. Cat., 2023, 547, Article ID 113403. <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2023.113403>
4. Bayat A., Sadjadi S., Arabi H., Bahri-Laleh N. Catalytic hydrofinishing of polyalphaolefins under mild condition using Pd on amino acid-functionalized clay: Study of the kinetic parameters. Inorg. Chem. Commun., 2022, Article ID 109923. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109923>
5. Tembe G., Patel N., Valodkar V. Recent developments in catalyst systems for selective oligomerization and polymerization of higher  $\alpha$ -olefins. Poly. Chem., 2023, 14, 2542-2571. <https://doi.org/10.1039/D3PY00028A>
6. Sun H, Shen B, Wu D, Guo X, Li D. Supported Al–Ti bimetallic catalysts for 1-decene oligomerization: Activity, stability and deactivation mechanism. J. Catal., 2016, 339, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2016.03.023>



7. Olejniczak A., Kucinska A., Cyganiuk A.W., Lukaszewicz J.P. Effect of *Salix viminalis* pyrolysis derived antioxidants on oxidative stability of diesters and diester–Poly- $\alpha$ -olefin Mixtures. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2012**, 51, 5117-5123. <https://doi.org/10.1021/ie2007054>
8. Cao L., Liu J., Wan Y., Yang S., Gao J., Pu J. Low-friction carbon-based tribofilm from poly- $\alpha$ -olefin oil on thermally oxidized Ti6Al4V. *Surf. Coat. Technol.*, **2018**, 337, 471-477. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.057>
9. Williamson J.B., Lewis S.E., Johnson III R.R., Manning I.M., Leibfarth F.A. C-H Functionalization of Commodity Polymers. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, 58, 8654-8668. <https://doi.org/10.1002/anie.201810970>
10. Guseinova, G.A., Samedova F.I., Shabalina T. N. Production of white oil bases by hydrogenation of olefin oligomers. *Chem. Technol. Fuels Oils.*, **2010**, 46, 25-30. <https://doi.org/10.1007/s10553-010-0179-6>
11. Toshtay K., Auezov A., Aubakirov Y., Amrousse R., Azat S., Sailaukhanuly Y., Nakan U. Palladium–nickel supported and palladated activated diatomite as an efficient catalyst for poly- $\alpha$ -olefins hydrogenation. *Catal. Surv. Asia.*, **2023**, 27, 296-305. <https://doi.org/10.1007/s10563-023-09394-y>
12. Sadjadi S., Koohestani F., Pareras G., Nekoomanesh-Haghighi M., Bahri-Laleh N., Poater A. Combined experimental and computational study on the role of ionic liquid containing ligand in the catalytic performance of halloysite-based hydrogenation catalyst. *J. Mol. Liq.*, **2021**, 331, 115740. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115740>
13. Nifant'ev I.E., Vinogradov A.A., Vinogradov A.A., Sedov I.V., Dorokhov V.G., Lyadov A.S., Ivchenko P.V. Structurally uniform 1-hexene, 1-octene, and 1-decene oligomers: Zirconocene/MAO-catalyzed preparation, characterization, and prospects of their use as low-viscosity low-temperature oil base stocks. *Appl. Catal. A-Gen.*, **2018**, 549, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2017.09.016>
14. ISO 3839:1996/AMD 1:2020 Petroleum products — Determination of bromine number of distillates and aliphatic olefins — Electrometric method — Amendment 1 <https://www.iso.org/standard/77907.html>
15. ISO 3104:2020 Petroleum products — Transparent and opaque liquids — Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity <https://www.iso.org/ru/standard/67965.html>
16. ISO 2909:2002 Petroleum products — Calculation of viscosity index from kinematic viscosity <https://www.iso.org/standard/29953.html>
17. ISO 1183-1:2019 Plastics — Methods for determining the density of non-cellular plastics — Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method <https://www.iso.org/standard/74990.html>
18. Toshtay K., Auezov A. B. Hydrogenation of vegetable oils over a palladium catalyst supported on activated diatomite. *Catal. Ind.*, **2020**, 12, 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2017.09.016>
19. Li B., Wang T., Le Q., Qin R., Zhang Y., Zeng H. C. Surface reconstruction, modification and functionalization of natural diatomites for miniaturization of shaped heterogeneous catalysts. *Nano Mater. Sci.*, **2022**, <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2022.05.001>
20. Liu D., Qiu F., Liu N., Cai Y., Guo Y., Zhao B., Qiu Y. Pore structure characterization and its significance for gas adsorption in coals: A comprehensive review. *Unconventional Resources.*, **2022**, 2, 139-157. <https://doi.org/10.1016/j.unres.2022.10.002>
21. Martin R.W., Deckman D.E., Kelly K.J., Emmett C.J., Hagemester M.P., Harrington B.A., Lin C.-Y., Matsunaga P.T., Ruff C.J., Stavens K.B., U.S. Patent US9234150 (2016).
22. Guseinova G.A., Samedova F.I., Shabalina T.N. Production of white oil bases by hydrogenation of olefin oligomers. *Chem. Technol. Fuels Oils.*, **2010**, 46, 25-30. <https://doi.org/10.1007/s10553-010-0179-6>
23. El-Gamal I.M., Gobel S. Synthesis and evaluation of poly- $\alpha$ -olefins for improving the flow properties of gas oil. *J. Appl. Polym. Sci.*, **1996**, 61, 1265-1272. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19960822\)61:8%3C1265::AID-APP5%3E3.0.CO;2-I](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19960822)61:8%3C1265::AID-APP5%3E3.0.CO;2-I)