

Коник В.М., Хлібишин Ю.Я., Почапська І.Я.

## МОДИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОГО КРЕКІНГУ НАФТОВОГО ЗАЛИШКУ

*У роботі досліджено модифікацію процесу термічного крекінгу вакуумного залишку шляхом активації киснем повітря, що дає змогу інтенсифікувати первинні реакції розщеплення вуглеводнів без застосування каталізаторів. Метою дослідження є визначення впливу температури (420–440 °С) та кількості активатора на вихід і склад легких фракцій, а також оцінка придатності залишкового продукту як котельного палива. Об'єктом дослідження виступав вакуумний залишок (зудрон) із західноукраїнської парафінової сирової нафти. Експерименти проводилися за атмосферного тиску з контролем температури реакції, часу витримки та об'ємної швидкості подачі повітря (2–4 л/(кг·хв)). У роботі наведено опис лабораторної установки, умов нагрівання й охолодження реакційної системи та методики експерименту. Порівняльне дослідження виконано у двох режимах: класичний термічний крекінг (без подачі повітря) та активований крекінг (із подачею повітря, що містить кисень). Встановлено, що підвищення температури процесу і введення повітря зумовлюють інтенсифікацію реакцій розщеплення, зміну співвідношення рідких і газових продуктів та зростання ступеня перетворення важких вуглеводнів. Додаткові експерименти з варіюванням швидкості подачі повітря при 440 °С дали змогу визначити оптимальні умови процесу. Збільшення кількості повітря до 4,0 л/(кг·хв) сприяє підвищенню виходу легких фракцій на 15 % в абсолютному та понад 70 % у відносному вираженні. Отримані результати підтверджують доцільність часткової активації киснем як ефективного методу інтенсифікації термічного крекінгу, що забезпечує підвищення глибини переробки важких нафтових залишків і може бути рекомендованим для вдосконалення енергоефективних технологій нафтохімічної переробки.*

**Ключові слова :** термічний крекінг, вакуумний залишок, вісбрекінг, активатор.

**Актуальність дослідження.** Поширені каталітичні технологія для покращення важкої нафти включає каталітичний крекінг (технологію декарбонізації) та гідрокрекінг (технологію гідрообробки) [1] Впровадження термокаталітичної та гідрокаталітичної переробки важких нафтових залишків ускладнюється їхньою високою вартістю, капіталомісткістю виробництва та енергоємністю. Натомість, процеси термічної переробки важких залишків характеризуються порівняно низькими капітальними та експлуатаційними витратами. Однак їхнім основним недоліком є відносно низький вихід легких вуглеводневих фракцій (бензину та дизельного палива), який зазвичай не перевищує 20–40%. [2] З огляду на світові тенденції розвитку нафтопереробки, особливу увагу приділено процесу вісбрекінгу, який відзначається технологічною простотою, відносно низькими експлуатаційними витратами та можливістю інтеграції у технологічні схеми існуючих НПЗ. Вісбрекінг є ефективним методом зниження в'язкості залишкових нафтових продуктів, а також отримання додаткових обсягів легких фракцій без застосування розріджувачів, що забезпечує його економічну доцільність.

**Постановка проблеми.** Широкого застосування набув процес збагачення важких залишків (вісбрекінг), який завдяки своїй відносній простоті з точки зору технології та конструкції обладнання дозволяє виробляти додаткову кількість легких нафтопродуктів та товарного котельного палива без необхідності використання розріджувачів. Інтеграція установок вісбрекінгу в схеми нафтопереробних заводів є особливо актуальною. Тому розробка методів активації процесів термічної конверсії для підвищення їх ефективності та виходу паливних фракцій, з одночасним отриманням комерційно цінних залишкових продуктів, є своєчасним та важливим завданням [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Нафтопереробка вступила у значний перехідний період, оскільки галузь перейшла у 21 століття. Зменшення запасів легкої малосірчистої нафти є серйозною проблемою для нафтової промисловості, оскільки дистиляція важких сортів нафти залишає значну кількість вакуумного залишку (близько 40% від усього обсягу переробленої сировини) [4, 5]. Очікується, що кількість важких залишків у майбутньому зростатиме з огляду на поступове збільшення частки важких сортів нафти. Загальновизнано, що перевагу матимуть ті нафтопереробні заводи, які здатні переробляти низькоякісну сирову нафту у високоякісні продукти та отримувати максимальну вигоду із залишкової сировини [6].

Загальносвітова потужність з переробки залишків нафти досягла близько 810 мільйонів метричних тонн на рік (близько 20% від усієї переробленої сирової нафти) з використанням різноманітних процесів переробки. Вісбрекінг, що застосовується з 1930-х років, є перевіреним часом робочим процесом у сфері ушляхетнення важких залишків перегонки нафти. Вісбрекінг — це м'який процес рідиннофазного термічного крекінгу, який знижує в'язкість і температуру застигання залишку таким чином, що він, може відповідати вимогам до якості котельного палива. Вісбрекінг пропонує економічне перетворення залишкової сировини на додаткові газові та дистилятні продукти, одночасно знижуючи в'язкість мазуту [7]. Крім того, вісбрекінг може бути ще більш привабливим, якщо нафтопереробний завод має незадіяне обладнання, яке можна модифікувати для цього процесу.

**Метою** даного дослідження є встановлення впливу активації процесу термічного крекінгу атмосферним киснем на кінетичні та якісні показники перетворення важких нафтових фракцій, зокрема на інтенсивність утворення легких вуглеводневих продуктів, скорочення тривалості процесу та збереження оптимальних властивостей важкого залишку.

**Експериментальна частина.** Дослідження було зосереджено на визначення впливу температури процесу та кількості активатора (кисню повітря) – на вихід і склад легких фракцій, а також оцінка можливості отримання залишкового продукту, придатного до використання як котельне паливо. Усі експерименти проводилися за атмосферного тиску та температур від 420 °С до 440 °С. При цьому температура парів продуктів крекінгу, що відводяться з реактора, підтримувалася в межах 310–320 °С.

Для оцінки ефективності як активованих, так і неактивованих процесів крекінгу використовувалися такі вихідні параметри:

- Масовий вихід легких фракцій ( $G_f$ , мас.%) – визначається як відношення маси отриманої легкої фракції до загальної маси вакуумного залишку (гудрон), що вводиться в процес.

- Інтенсивність утворення легкої фракції ( $A_f$ , мас.%/хв) – відношення зміни масового виходу легкої фракції ( $\Delta G_f$ ) до інтервалу часу ( $\Delta \tau_p$ ), протягом якого цю фракцію збирали.

У цьому дослідженні легкі фракції визначалися як усі продукти крекінгу, що киплять за атмосферного тиску при температурі, що не перевищує 360 °С. Масовий вихід легких фракцій використовувався виключно для оцінки швидкості крекінгу.

На цьому етапі дослідження було визначено залежність швидкості утворення легкої фракції від її масового виходу за трьох фіксованих температур (420, 430 та 440 °С) за постійної об'ємної швидкості подачі повітря, нормалізованої на одиницю маси вакуумного залишку, завантаженого в реактор. Попередніми дослідженнями встановлено, що оптимальною швидкістю подачі повітря є 3,0 л/(кг·хв), що відповідає швидкості потоку повітря 0,75 л/хв.

Як сировину для виробництва окисненого нафтового бітуму було використано вакуумний залишок (гудрон), отриманий із західноукраїнської парафінової сирової нафти. Характеристики вихідної сировини були наступними:

- Температура розм'якшення (метод кільця та кульки): 42 °С

- Пластичність при 25 °С: 13 см

- Проникнення при 25 °С: 245 × 0,1 мм

Груповий склад (мас. %): асфальтени – 19,60; смоли – 24,38; оливи – 56,02 (включно з парафінами – 5,42).

Процес вісбрекінгу проводили у попередньо зважений реактор завантажували 100 г вихідної сировини. Гудрон розігрівали на лабораторній електроплитці. Зважували колбу-приймач для вловлювання світлих нафтопродуктів. Реактор із гудроном клали у піч і без доступу повітря нагрівали до робочої температури. Регулювання температури та інтенсивність нагрівання здійснювали за допомогою ЛАТРа. При досягненні заданої температури реактор з гудроном витримували у печі 5-10 хв., далі процес нагрівання припиняли, а реактор охолоджували. Після охолодження зважували реактор і колбу-приймач та визначали вихід продуктів.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Промислові процеси вісбрекінгу проводять при температурах 440-480 °С. За таких умов тривалість процесу є доволі малою. Нами вибрано дещо нижчий температурний інтервал, а саме 420-440°С, що дозволило краще дослідити вплив температури на інтенсивність процесу та вихід продуктів. Було реалізовано два варіанти процесу один класичний інший з додаванням кисню повітря. Для зменшення часу нагрівання сировини до температури проведення досліду, у попередньо нагрітий реактор із відповідної ємності подавали нагрітий до температури 250°С гудрон. Температуру досліду підтримали за допомогою електронного регулятора. При досягненні температури досліду засікали час і через однакові проміжки відбирали отримані в результаті реакції дистилятні фракції які охолоджувались в холодильнику-конденсаторі. Також в газометр вловлювали утворені газу.

При дослідженні процесу із подаванням кисню повітря установку доповнювала система подачі повітря. Вона складалася із компресора, ареометра та печі для попереднього нагріву повітря. Гаряче повітря при температурі досліду вводили в реактор.

Отримані фракції зважували та об'єднували для наступних досліджень фракційний складу.

Інтенсивність утворення легкої фракції та масовий вихід легких фракцій при різних температурах (420 °С, 430 °С та 440 °С) подано в таблицях 1-3. Як видно з представленої інформації, при усіх температурах інтенсивність процесу суттєво зростає, коли процес проходить з подачею кисню.

Таблиця 1

Результати дослідження процесу термічного крекінгу вакуумного залишку з вдунанням повітря та без нього за температури 420 °С

$\tau_p$ , хв.	Без повітря		З повітрям: 3,0 л/(кг·хв)	
	$G_f$ , мас.%	$A_f$ , мас.%/хв	$G_f$ , мас.%	$A_f$ , мас.%/хв
10	4,2340	0,4234	3,815	0,3815
20	8,8540	0,462	9,021	0,5206
30	13,6380	0,4784	14,395	0,5374
40	18,0000	0,4362	19,401	0,5006
50	21,5810	0,3581	23,463	0,4062

60	24,6870	0,3106	26,429	0,2966
70	27,3670	0,268	28,964	0,2535
80	29,5000	0,2133	30,872	0,1908
90	31,0750	0,1575	32,639	0,1767

Таблиця 2

Результати дослідження процесу термічного крекінгу вакуумного залишку з вдуванням повітря та без нього за температури 430 °С.

$\tau_p$ , хв	Без повітря		З повітрям: 3,0 л/(кг·хв)	
	$G_f$ , мас.%	$A_f$ , мас.%/хв	$G_f$ , мас.%	$A_f$ , мас.%/хв
5	3,675	0,695	3,041	0,6082
10	8,174	0,8998	8,677	1,1272
15	13,668	1,0988	16,577	1,580
20	19,158	1,098	24,214	1,5274
25	23,541	0,8766	29,418	1,0408
30	27,172	0,7262	32,758	0,668
35	30,264	0,6184	35,10	0,4684
40	32,904	0,528	37,237	0,4274

На основі отриманих залежностей можна зробити висновок, що введення кисню в реакційну суміш за температур, що відповідають активному крекінгу вакуумного залишку, значно збільшує швидкість утворення легкої фракції порівняно з неактивованим термічним крекінгом.

Таблиця 3

Результати дослідження процесу термічного крекінгу вакуумного залишку з вдуванням повітря та без нього за температури 440 °С.

$\tau_p$ , хв	Без повітря		З повітрям: 3,0 л/(кг·хв)	
	$G_f$ , мас.%	$A_f$ , мас.%/хв	$G_f$ , мас.%	$A_f$ , мас.%/хв
5	9,528	1,905	10,397	2,079
7	–	–	17,293	2,948
10	20,792	2,253	25,852	3,186
12	–	–	31,092	2,620
15	29,023	1,646	36,948	1,952
20	34,651	1,126	–	–

Результати дослідження показали, що підвищення температури реакції та введення кисню суттєво впливають на кінетику процесу. Зокрема, за температури 420 °С швидкість утворення легкої фракції у присутності активації киснем зростає на 10–15% (тобто в 1,1–1,15 рази) порівняно зі звичайним термічним крекінгом, при цьому тривалість реакції досягає приблизно 100 хвилин. При підвищенні температури до 430 °С швидкість зростає на 30–40% (в 1,3–1,4 рази), а час реакції скорочується до 25–30 хвилин. За 440 °С швидкість утворення зростає на 50–60% (в 1,5–1,6 рази), а реакція завершується протягом 10–15 хвилин.

Таким чином, найбільш виражений ефект підвищення швидкості крекінгу досягається за підвищених температур, причому максимальна швидкість реакції реалізується протягом коротшого інтервалу часу від початку процесу. Отже, киснева активація киснем повітря сприяє істотному скороченню тривалості активної фази реакції та підвищенню швидкості крекінгу, що є наслідком посилення процесів первинного розщеплення високомолекулярних компонентів.

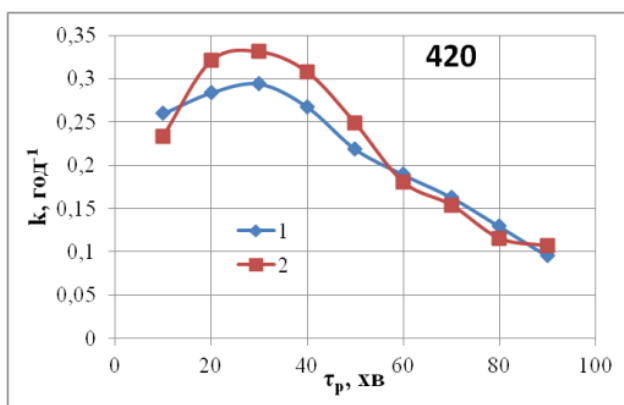
Для визначення оптимальної кількості активатора, зокрема кисню з повітря, було проведено другу серію експериментів. Додаткові експерименти з варіюванням швидкості подачі повітря при температурі 440 °С дозволили визначити оптимальні умови процесу. У цій серії швидкість подачі повітря в реактор змінювалася від 0,5 до 1,0 л/хв, що відповідає еквівалентній об'ємній швидкості потоку 2,0–4,0 л/(кг·хв) за постійної температури 440 °С. Результати дослідження представлені в таблиці 4.

Аналіз отриманих результатів показав, що зі збільшенням кількості повітря, що подається за той самий час крекінгу, вихід легких фракцій збільшується на 15% в абсолютному представленні (або більш ніж на 70% у відносному представленні).

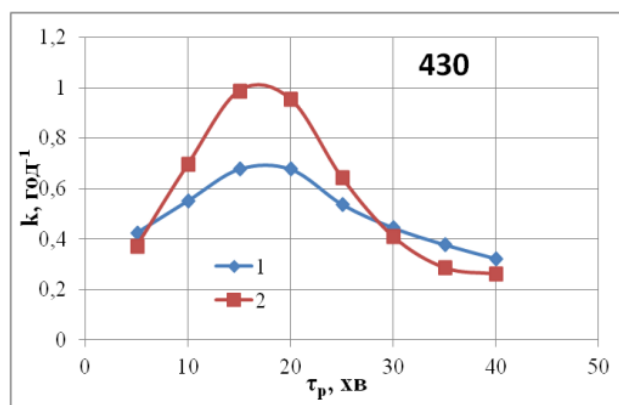
Результати дослідження процесу термічного крекінгу вакуумного залишку з вдунанням повітря та без нього за температури 440 °С.

$\tau_p$ , хв	Без повітря		З повітрям					
			2,0 л/(кг·хв)		3,0 л/(кг·хв)		4,0 л/(кг·хв)	
	$G_{\phi}$ , мас.%	$A_{\phi}$ , мас.%/хв	$G_{\phi}$ , мас.%	$A_{\phi}$ , мас.%/хв	$G_{\phi}$ , мас.%	$A_{\phi}$ , мас.%/хв	$G_{\phi}$ , мас.%	$A_{\phi}$ , мас.%/хв
2	2,425	1,216	2,795	1,397	3,493	1,746	3,746	1,873
4	5,197	1,386	5,589	1,397	7,602	2,055	9,637	2,945
6	8,662	1,732	9,432	1,922	13,799	3,098	16,162	3,263
8	13,257	2,297	14,240	2,404	20,354	3,277	25,245	4,542
10	17,762	2,253	19,131	2,445	25,852	2,749	30,835	2,795

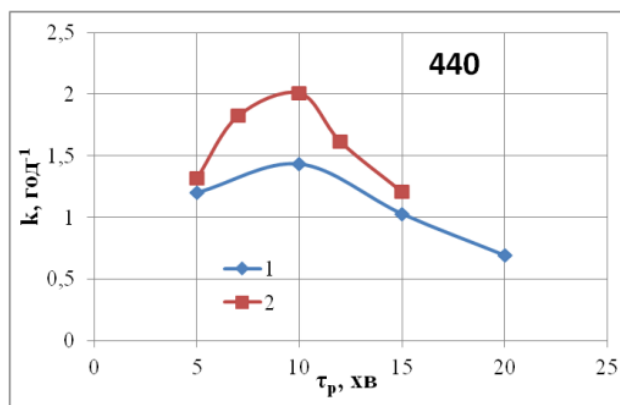
Активуєчий ефект кисню повітря стає ще більш вираженим: збільшення виходу легкої фракції більше, ніж удвічі порівняно з крекінгом без подачі повітря. Результати дослідження показали, що на початковій стадії процесу (до 6 - 8 хвилин) вихід збільшується, після чого починає знижуватися. Це свідчить про зниження швидкості реакції крекінгу відносно реакцій полімеризації та конденсації. Таким чином, при температурі 440 °С тривалість процесу протягом якого може відбуватися відновлення легкої фракції без суттєвого збільшення в'язкості залишку, становить приблизно 10 хвилин. Протягом цього часу (див. таблицю 4), з початкової кількості гудрону можна отримати понад до 31% маси легких фракцій, тоді як залишковий продукт крекінгу зберігає відносно низьку в'язкість.



а)



б)



в)

Рисунок 1 - Вплив температури та часу на константу швидкості процесу термічного крекінгу вакуумного залишку: а), б), в) - відповідно температури процесу 420, 430, 440 °С; 1 - процес без повітря, 2 - процес із повітрям (витрата 3 л/(кг·хв))

Кінетичний аналіз процесу показав, що константа швидкості реакції ( $k$ ) різко зростає з підвищенням температури, що узгоджується з рівнянням Арреніуса. Так, підвищення температури з 420 °С до 440 °С

призводить до збільшення пікових значень  $k$  приблизно в 5–6 разів, що повністю узгоджується з рівнянням Арреніуса.

У всіх серіях дослідів форма кривих « $k$ – $\tau_p$ » подібна: на початкових стадіях відбувається зростання  $k$  до пікового значення, яке відповідає максимальній швидкості реакції за рахунок високої концентрації реакційно-здатних компонентів. Після досягнення піку константа швидкості поступово зменшується, що пов'язано з вичерпанням запасу активних молекул та зростанням внеску вторинних процесів.

Додавання кисню повітря змінює не лише абсолютні величини  $k$ , а й характер перебігу процесу. Якщо при нижчій температурі (420 °C) вплив кисню відносно невеликий і пікові значення  $k$  у двох системах близькі, то зі зростанням температури різниця стає виразною. Це підтверджується тим, що при переході від 420 °C до 440 °C пікове значення  $k$  у системі з киснем зростає приблизно в 6,1 рази, тоді як без кисню — лише в 4,9 рази. Таким чином, кисень особливо ефективний для інтенсифікації первинних реакцій розщеплення саме у високотемпературній зоні.

Аналіз часових залежностей показав, що тривалість активної фази процесу скорочується зі зростанням температури. Важливим наслідком інтенсифікації процесу є скорочення тривалості його активної фази. Зі збільшенням константи швидкості реакційний ресурс витрачається значно швидше. Так, час, протягом якого реакція відбувається зі швидкістю не менше 50% від пікової, при підвищенні температури з 420 °C до 440 °C скорочується приблизно в 4,4 рази (з ~65 хв до ~15 хв) для безкисневого процесу та в 5,6 рази (з ~56 хв до 10 хв) для процесу з додаванням кисню. Це означає, що інтенсивна фаза крекінгу стає не тільки швидшою, але й значно коротшою.

Таким чином, підвищення температури одночасно збільшує абсолютні значення  $k$  та посилює відмінності між безкисневим і кисневим процесами, особливо у зоні максимуму швидкості. При цьому загальна тенденція збережена: незалежно від умов, після досягнення пікової швидкості відбувається спад константи через обмежений запас реакційно спроможних компонентів і зміщення складу реакційної суміші у бік продуктів крекінгу.

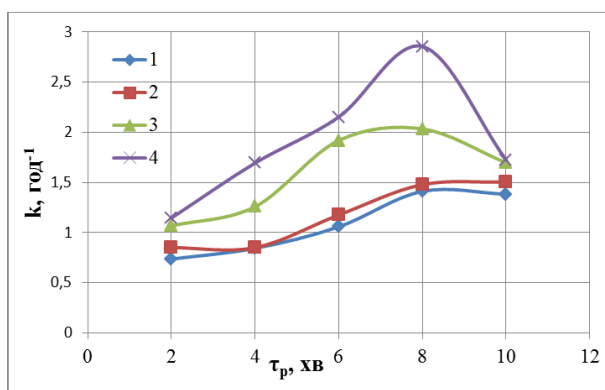


Рисунок 2. Вплив часу та кількості поданого повітря на константу швидкості процесу термічного крекінгу вакуумного залишку при температурі 440 °C: 1 - процес без повітря; 2, 3, 4 - процес із повітрям (витрата повітря відповідно 2, 3, 4 л/(кг·хв))

При дослідженні процесу термічного крекінгу за сталої температури 440 °C спостерігається чітка закономірність: зі збільшенням концентрації доданого кисню повітря від 0 до 4,0 л/(кг·хв) константа швидкості реакції ( $k$ ) суттєво зростає. У всіх дослідях форма кривих « $k$  –  $\tau_p$ » є подібною: на початкових етапах (2 – 8 хв) відбувається зростання  $k$  до пікового значення, яке відповідає максимальній швидкості процесу. Це пояснюється високою початковою концентрацією реакційно-здатних компонентів. Після досягнення піку (після 8–10 хв) константа швидкості починає зменшуватися, що пов'язано з вичерпанням сировини та накопиченням продуктів крекінгу, які можуть брати участь у вторинних реакціях.

Додавання кисню повітря кардинально змінює абсолютні величини константи швидкості та динаміку процесу. Якщо в безкисневому процесі (див. Рисунок 2, 1) максимальне значення  $k$  становить 1,41 год<sup>-1</sup> (на 8-й хвилині), то навіть помірне додавання кисню (2,0 л/(кг·хв), (Рисунок 2, 2) підвищує цей показник до 1,50 год<sup>-1</sup>. Подальше збільшення концентрації кисню призводить до різкого зростання швидкості: Так при 3,0 л/(кг·хв) (Рисунок 2, 3) пікове значення  $k$  сягає 2,03 год<sup>-1</sup>, а при 4,0 л/(кг·хв) (Рисунок 2, 4) досягає 2,86 год<sup>-1</sup>, що більш ніж удвічі перевищує показник безкисневого процесу.

Внаслідок такої інтенсифікації відбулася зміна характеру активної фази процесу. Хоча час досягнення піку залишається приблизно однаковим (8–10 хв) для всіх дослідів, при високих концентраціях кисню пік швидкості стає значно вищим і гострішим. Це означає, що інтенсивна фаза крекінгу стає не стільки коротшою, скільки набагато продуктивнішою. Реакційний ресурс витрачається значно швидше, що вимагає точнішого контролю над процесом. Підвищення температури від 420 до 440 °C збільшує пікові значення  $k$  у 5–6 разів. При цьому додавання кисню змінює не лише абсолютні величини  $k$ , а й форму кінетичних кривих: пік швидкості досягається швидше і має вищу амплітуду, що свідчить про посилення первинних реакцій розщеплення. У зоні підвищення

температур кисень діє як активатор, ініціюючи радикальні механізми, які сприяють деструкції високомолекулярних сполук і стабілізації вільних радикалів, зменшуючи ймовірність утворення коксу

Таким чином, ми встановили, що підвищення концентрації кисню при реалізації процесу є суттєво сприяє значному прискоренню процесу термічного крекінгу. Як наслідок - застосування збільшити продуктивність установки. При вищезазначених умовах реалізується баланс між високою швидкістю крекінгу та стабільністю процесу, що забезпечує мінімальне коксоутворення та задовільну якість залишкових фракцій.

Крім цього було визначено структурний та груповий склад важких залишків і фракцій ( п.к. - 280°C) для активованого та термічного крекінгу (див. таблицю 5).

Таблиця 5

Результати дослідження структурно-групового складу продуктів термічного крекінгу гудрону з додаванням та без додавання повітря за температури 440°C.

Вуглеводні	Склад, % мас.	
	Без повітря	З повітрям
Структурно-груповий склад фракції (п.к.-280°C).		
Олефінові вуглеводні	19,52	13,68
Парафіни , в тому числі:	50,66	67,85
- Лінійні парафіни	24,34	40,37
- Циклопарафіни	8,90	7,05
- Ізопарафіни	17,42	20,43
Ароматичні вуглеводні	20,30	16,10
Груповий склад залишку.		
Насичені вуглеводні	9,07	7,50
Ароматичні вуглеводні	43,49	48,41
Смоли	16,39	19,08
Асфальтени	31,05	25,01

**Висновки.** 1. Активація процесу термічного крекінгу атмосферним киснем значно збільшує швидкість утворення легких фракцій (до 1,6 рази) та скорочує тривалість процесу в 2–3 рази, особливо за температур 430–440 °С.

2. Збільшення кількості подаваного повітря позитивно впливає на об'ємний вихід легких фракцій: при 440 °С протягом 10 хвилин було отримано понад 35 об .% , що на 15% вище порівняно з неактивованим процесом. При цьому зберігаються оптимальні властивості важкого залишку.

3. Склад отриманих фракцій свідчить про переважання парафінів у легких продуктах та зменшення вмісту асфальтенів у залишку, що підтверджує ефективність киснево-активованого крекінгу як з енергетичної, так і з технологічної точки зору.

Практична цінність проведених досліджень полягає у можливості підвищення глибини переробки нафти без застосування дорогих каталізаторів та високого тиску, що робить процес доступним для впровадження на малих і середніх нафтопереробних підприємствах. Отримані експериментальні дані можуть бути використані для моделювання термічного крекінгу залишків, розроблення енергозберігаючих технологічних режимів і вдосконалення промислових схем вісбрекінгу. Крім того, дослідження підтверджують перспективність використання активації киснем як універсального підходу до інтенсифікації термокаталітичних процесів переробки важких вуглеводнів.

#### Література

1. Prospects of refinery switching from conventional to integrated: An opportunity for sustainable investment in the petrochemical industry /M. Al-Samhan et al. Fuel. 2022. Vol. 310. P. 122-161. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122161>
2. Grynshyn O.; Khlbyshyn Y.; Nagursky A.; Nagursky O. Methods of Obtaining Bitumen from Heavy Oil Processing Residues., Techn. Audit i Rezervy Proizvod. 2015, 5/4, 45-48. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.51054>
3. Nicholas P. Cheremisinoff, Paul Rosenfeld. Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production - Best Practices in The Petroleum Industry: Chapter 1.- William Andrew, 2010. – 257 p., P. 1 – 97/ URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2035-1.10001-6>
4. A review of recent advances on process technologies for upgrading of heavy oils and residuals / M. S. Rana et al. Fuel. 2007. Vol. 86, no. 9. P. 1216–1231. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.08.004>
5. Speight, J. G. (2015). Handbook of petroleum product analysis. John Wiley & Sons.
6. Gembicki, V. A.; Cowan, T. M.; Brierley, G. R. Upgrade Processing Operations to Handle Heavy Feedstocks. Hydrocarbon Process. 2007, 86(2), 41. <https://doi.org/10.1021/ie0710871>

7. Nedelchev, Angel & Stratiev, Dicho & Stoilov, G. & Dinkov, Rosen & Lepidis, K. & Sharpe, Ron & Russell, Christopher & Petkova, N. & Petkov, P.. (2013). Visbreaker Performance Improvement by Optimisation of Process Conditions and Application of Chemical Additive Treatment Program. Oil Gas European Magazine. 39. 147-153p.

#### References

1. Prospects of refinery switching from conventional to integrated: An opportunity for sustainable investment in the petrochemical industry /M. Al-Samhan et al. Fuel. 2022. Vol. 310. P. 122-161. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122161>
2. A review of recent advances on process technologies for upgrading of heavy oils and residua / M. S. Rana et al. Fuel. 2007. Vol. 86, no. 9. P. 1216–1231. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.08.004>
3. Nicholas P. Cheremisinoff, Paul Rosenfeld. Handbook of Pollution Prevention and Cleaner Production - Best Practices in The Petroleum Industry: Chapter 1.- William Andrew, 2010. – 257 p., P. 1 – 97/ URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2035-1.10001-6>
4. A review of recent advances on process technologies for upgrading of heavy oils and residuals / M. S. Rana et al. Fuel. 2007. Vol. 86, no. 9. P. 1216–1231. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.08.004>
5. Speight, J. G. (2015). Handbook of petroleum product analysis. John Wiley & Sons.
6. Gembicki, V. A.; Cowan, T. M.; Brierley, G. R. Upgrade Processing Operations to Handle Heavy Feedstocks. Hydrocarbon Process. 2007, 86(2), 41. <https://doi.org/10.1021/ie0710871>
7. Nedelchev, Angel & Stratiev, Dicho & Stoilov, G. & Dinkov, Rosen & Lepidis, K. & Sharpe, Ron & Russell, Christopher & Petkova, N. & Petkov, P.. (2013). Visbreaker Performance Improvement by Optimisation of Process Conditions and Application of Chemical Additive Treatment Program. Oil Gas European Magazine. 39. 147-153p.

*The work investigated the modification of the vacuum residue thermal cracking process by partial activation with air oxygen, which makes it possible to intensify the primary hydrocarbon cracking reactions without the use of catalysts. The aim of the study is to determine the effect of temperature (420–440 °C) and the amount of activator on the yield and composition of light fractions, as well as to assess the suitability of the residual product as a boiler fuel. The object of the study was vacuum residue (tar) from Western Ukrainian paraffinic crude oil. The experiments were carried out at atmospheric pressure with control of the reaction temperature, holding time, and air flow rate (2–4 l/(kg·min)). The paper describes the laboratory setup, the conditions of heating and cooling of the reaction system, and the experimental methodology. The study was performed in two modes: classical thermal cracking (without air supply) and activated cracking (with the supply of air containing oxygen). We found that increasing the process temperature and introducing oxygen lead to an intensification of the cleavage reactions, a change in the ratio of liquid and gas products, and an increase in the degree of conversion of heavy hydrocarbons. Additional experiments with varying the air supply rate at 440 °C allowed us to determine the optimal process conditions. Increasing the amount of air to 4.0 l/(kg·min) contributes to an increase in the yield of light fractions by 15% in absolute terms and over 70% in relative terms. The obtained results confirm the feasibility of partial oxygen activation as an effective method of thermal cracking intensification, which provides an increase in the processing depth of heavy oil residues and can be recommended for improving energy-efficient petrochemical processing technologies.*

*Keywords: thermal cracking, vacuum residue, visbreaking, activator.*

**Коник В.М.** – аспірант кафедри технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка»

**Хлібшин Ю.Я.** – к.т.н., доцент кафедри технології органічних продуктів, Національний університет «Львівська політехніка»

**Почапська І.Я.** – к.т.н., доцент кафедри цивільної безпеки, Національний університет «Львівська політехніка»

Стаття надійшла до редакції: 15.10.2025 р.

Стаття прийнята до друку: 24.10.2025 р.

Стаття опублікована: 09.12.2025 р.