

УДК 662.758

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217000

Визначення впливу кавітаційної обробки на октанове число газоконденсатного бензину, модифікованого ізопропанолом

С. О. Кудрявцев, О. Б. Целіщев, С. В. Леоненко, С. В. Бойченко, М. Г. Лорія

Досліджено вплив кавітації на октанове число для газоконденсатного бензину із добавкою ізопропанолу в кількості 0–12 % об'ємних. Проаналізовані публікації, що доказують вплив кавітації на інтенсифікацію реакцій крекінгу нафтопродуктів. Кавітація також ініціює реакції взаємодії вільних радикалів із спиртами. Запропоновано лабораторну схему установки для дослідження процесу кавітаційної обробки на характеристики бензинів, модифікованих спиртами. Розроблено методологію із вивчення впливу інтенсивності кавітаційної обробки на октанове число бензинів. Експериментально доказане зростання октанового числа газоконденсатного бензину, модифікованого ізопропанолом, при його кавітаційній обробці, на 0,3–0,9 пункти. Вивчений вплив кількості циклів кавітаційної обробки на показник октанового числа та показано, що стале значення приросту октанового числа досягається за 7–8 циклів кавітаційної обробки при тиску на виході з форсунки 9,0 МПа. Обґрунтоване зменшення добавки ізопропанолу, необхідне для виробництва бензинів марок А-95 та А-98, при використанні технології кавітаційної обробки. Експериментально підтверджено, що в порівнянні із простим механічним змішуванням спирту та вуглеводневого бензину застосування кавітації зменшує витрати ізопропанолу на 17 % (з 3,0 % об. до 2,5 % об.) при виробництві бензину марки А-95; і на 14 % (з 8,1 % об. до 7,0 % об.) при виробництві бензину марки А-98. Вплив концентрації ізопропанолу на приріст октанового числа бензину, виміряного за дослідницьким методом, в умовах кавітаційної обробки має нелінійний характер: з максимумами при концентраціях 1,0 % об. та 3,5 % об. та 6,5 % об. Варіюванням початкової концентрації ізопропанолу та октанового числа вуглеводневої бензинової фракції можна оптимізувати технологічний режим виробництва бензинів А-95 та А-98 за витратами сировини та за енерговитратами.

Ключові слова: гідродинамічна кавітація, ізопропанол, октанове число, біоетанол, газоконденсатний бензин, октанометр, інтенсифікація.

1. Вступ

Ефект гідродинамічної кавітації – утворення та наступне схлопування бульбашок рідини – активно використовується в хімічній технології для селективного підведення енергії до реакційної зони. Кожну бульбашку можна розглядати як окремий реактор, в якому зміною режиму кавітації можна керувати температурою та тиском, локально збільшуючи їх в десятки разів. За умови достатньо інтенсивної кавітаційної обробки рідини можна досягти значного пришвидшення хімічних реакцій за відносно невеликих енерговитрат. Деякі процеси хімічної технології, наприклад крекінг вуглеводневих молекул та рекомбіна-

ція радикалів, в умовах кавітації можна здійснювати при кімнатній температурі та досягати результатів, притаманних процесам термічного та термокаталітичного крекінгу.

Ефективною виявилась кавітаційна обробка бензинів, модифікованих спиртами, з метою підвищення їх октанового числа (ОЧ). Вплив кавітації на спирт-бензинові суміші дозволяє збільшити показники ОЧ, визначеного як за дослідницьким (RON – research octane number), так і за моторним (MON – motor octane number) методами. Застосування кавітації дозволяє розробити ефективну технологію виробництва товарних марок бензинів А-95, та А-98. Нова технологія дозволить зменшити витрати на сировину – високооктанову присадку до палива – в порівнянні із звичайним механічним змішуванням рідин.

В перспективі це зменшить собівартість товарних бензинів та прибуток від їх реалізації. Ці факти роблять актуальним науковим та практичним завданням пошук технологій та режимів ефективної кавітаційної обробки спирт-бензинових сумішей.

Ізопропанол (ІПС) є перспективною сировиною серед інших одноатомних спиртів для використання в суміші із газоконденсатними бензинами.

В порівнянні із метанолом використання ІПС є більш доцільним. ІПС має меншу за метанол токсичність. Стандарт ДСТУ 7687:2015 дозволяє використовувати більшу об'ємну кількість ІПС – 12 % об'ємних для бензину виду Е10. Дозволена кількість метанолу становить лише 3,0 % об'ємних.

В порівнянні із етанолом використання ІПС також є доцільним, бо його виробництво не має такого жорсткого законодавчого регулювання. Основна кількість ІПС в світі виготовляється шляхом гідратації пропілену. В найближчі роки в світовому масштабі можливе вивільнення пропілену під виробництво ІПС внаслідок загальної тенденції до зменшення виробництва пластиків, в тому числі і поліпропілену, який також виробляється в пропілену. Тому ІПС цілком може створити конкуренцію метанолу та біоетанолу в якості високооктанової присадки до бензинів.

Розробка технологій модифікації бензинів ізопропанолом під дією кавітації є актуальним науковим завданням і має реальні перспективи для швидкого впровадження в промисловість.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Кавітація є ефективним інструментом селективного підведення енергії до зони хімічної реакції. В останні роки активно розвивається наукові напрямки, пов'язані із вивченням впливу акустичної та гідродинамічної кавітації на процеси переробки нафтових фракцій.

В роботі [1] досліджували вплив ультразвукової кавітаційної обробки сировини на фізико-хімічні властивості та вміст асфальтенів в нафтових залишках. Показано, що інтенсивна кавітаційна дія з інтенсивністю 24 кГц призводить до зменшення загальної кількості асфальтенів з 13,5 до 7 % та до зниження характеристик в'язкості. Зменшення асфальтенів показує, що кавітацією вдалось досягти ініціалізації реакцій крекінгу високомолекулярних вуглеводневих молекул. Процес проводився при кімнатній температурі та тиску із дотриман-

ням часу кавітаційної обробки більше за 15 хвилин. Але в даній статті не розкритий механізм впливу кавітації на хімічний склад продуктів.

В роботі [2] вивчений вплив гідродинамічної кавітації на в'язкість важкої нафти в присутності наночастинок металу та донору водню, яким може виступати бензинова фракція. Показано, що додавання 0,01 л бензину на 1 літр важкої нафти та 10-хвилинний процес кавітаційного крекінгу при 80 °С та заатмосферному тиску дозволяє зменшити в'язкість важкої нафти приблизно на 20 %. Але дана робота не показує, як впливає кавітація на формування каталітичних активностей металу, хоча задекларовано виникнення активних наночастинок каталізатору. Аналогічні завдання вирішували і в роботі [3], але в якості донору водню застосовувався тетрагідронафтальін. В цьому випадку використання кавітації також дозволило здійснити перерозподіл водню та зменшити в'язкість важкої нафти, хоча не вивчено зміну складу та октанового числа бензинової фракції нафти.

В роботі [4] добре показаний вплив кавітації на крекінг вуглеводневих молекул з числом атому вуглецю дів 8 до 26. Застосування ультразвукової кавітації до дизельної фракції в цій роботі призвело до утворення наночастинок сажі. Та автори не пов'язали механізм сажоутворення із інтенсифікацією реакцій, що паралельно можуть підвищувати октанове число бензинів. Інтенсивна кавітаційна обробка сировини в деяких технологічних режимах може пришвидшити не тільки реакції крекінгу, але і інтенсифікувати процеси полімеризації. В роботі [5] показано, що в процесі кавітаційної обробки важкої нафти в присутності наночастинок нікелю відбулось збільшення в'язкості продукту. Авторами не зроблено висновків щодо необхідної та достатньої інтенсивності механохімічної активації сировини через кавітацію для недопущення реакцій ущільнення.

Доказаний вплив гідродинамічної кавітації на склад продуктів крекінгу навіть коли кавітація побічним параметром. В роботі [6] показано, як кавітаційні процеси в насосі перед колоною фракціонування установки каталітичного крекінгу здатні змінити фракційний склад продуктів та характеристики бензину, але вплив кавітації на октанове число не був підтверджений експериментальними даними.

Теоретичне обґрунтування кількості енергії, необхідної для розриву хімічних зв'язків в нафті при її кавітаційній обробці, виконане в роботі [7]. Збільшення легких продуктів розгонки досягло 5 % на вихідну сировину, тобто кількість важких фракцій, що піддались крекінгу під дією кавітації, досягла 10–18 %. Автори показали, що існує можливість здійснення процесів крекінгу сировини виключно впливом кавітації, але не запропонували виокремлення цього процесу в технологію виробництва окремих компонентів та товарних марок бензинів.

Моделювання кавітаційного крекінгу вуглеводнів проведене в роботі [8]. Тут визначено швидкість руху рідини 43 м/с, достатню для кавітаційних перетворень в відцентрованій кавітаційній камері та показано неоднорідність кавітаційних процесів в апараті. Тобто, від конструкції кавітаційного пристрою багато в чому залежить ефективність процесу модифікації нафтових фракцій, зокрема і бензинів, хоча не вивчено вплив швидкості руху рідини на хімічні перетворення сировини. Дослідження, наведені в [9], показали, що гідродинамічна кавітація є потенційно

привабливим варіантом як технологія інтенсифікації процесів модернізації важкої нафти, і ці процеси є перспективними для модернізації нафтопереробних заводів, але конкретних пропозицій щодо оформлення технологічних процесів не надано. У огляді [10] пояснили механізм, за допомогою якого кавітаційні технології інтенсифікують деемульгування води в емульсіях, зменшення в'язкості сирої нафти, окислювальну десульфурацію та деметалізацію нафти та окремих фракцій. Це робить кавітацію перспективною технологією комплексного впливу на нафтові фракції, що дозволить одночасно покращувати декілька необхідних характеристик продуктів, хоча не показано, як домішки води впливають на хімічні перетворення вуглеводнів під дією кавітації.

В роботі [11] досліджені різноманітні технологічні режими обробки нафтових фракцій із здійсненням процесу гідрокрекінгу вуглеводнів, і хоча основним продуктом цих процесів є бензинова фракція, зміну її експлуатаційних властивостей не досліджено. В роботі [12] показано вплив кавітації на процеси згоряння палива, але процеси виготовлення палив та їх згоряння під дією кавітації не пов'язані однією теорією.

Власні дослідження, наведені в [13], показали можливість змінення октанового числа бензину А-92 через зміну інтенсивності кавітаційної обробки. Встановлено, що існує оптимальний час кавітаційної обробки, за якого досягається максимальний вплив кавітації на октанове число. Але в цій роботі не наведено теорії, що пов'язує час кавітації із інтенсивністю механохімічної активності бензину та не вивчено вплив кавітації на бензини при додаванні спиртів. В наступній роботі [14] було вивчено вплив кавітаційної обробки на характеристики бензинової фракції, модифікованої біоетанолом. Показано, що кавітація здатна значно покращити антидетонаційні характеристики спирт-бензинових сумішей, але не наведені експериментальні дані для вивчення впливу кавітації при модифікації бензинів іншими одноатомними спиртами.

Аналіз публікацій показав можливість та перспективність впровадження технологій кавітаційної обробки в процеси модифікації палив. Вивчення впливу кавітації на ОЧ газоконденсатного бензину, модифікованого ІПС, є перспективним для досліджень, бо відкриває можливість створення технології виробництва товарних марок бензинів А-95 та А-98 із зменшеними витратами на високооктанову добавку. Ізопропанол сьогодні має меншу ринкову вартість, чим така розповсюджена високооктанова добавка, як МТБЕ. Також ІПС є реальним конкурентом біоетанолу, бо має перспективу виробництва в значних кількостях з пропілену від установок каталітичного крекінгу. Використання ІПС та кавітаційна обробка спирт-бензинових сумішей дозволить виробляти товарні марки бензинів із меншими витратами на сировину в порівнянні із традиційними технологічними процесами.

3. Мета за задачі дослідження

Метою роботи є визначення впливу кавітаційної обробки на ОЧ сумішей газового конденсату та ІПС різних концентрацій для виробництва товарних марок бензинів А-95 та А-98.

Для досягнення даної мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідити зміну ОЧ від кількості циклів кавітаційної обробки;
- виявити вплив кавітації на приріст ОЧ для суміші газоконденсатного бензину з ІПС в різних концентраціях;
- надати рекомендації щодо технологічних режимів кавітаційної обробки для виробництва товарних бензинів марок А-95, А-98 з газового конденсату та ІПС.
- порівняти витрати ІПС на виробництво товарних марок бензинів А-95 та А-98 при механічному змішуванні ІПС та газоконденсатного бензину та при кавітаційній обробці спирт-бензинової суміші.

4. Матеріали та методи досліджень

Лабораторну установку, що призначена для вивчення впливу числа циклів кавітаційної обробки на ОЧ бензинів, модифікованих спиртами, зображено на рис. 1 – в схематичному вигляді (рис. 1, а) та у вигляді фотографії (рис. 1, б).

До початку експерименту готували спирт-бензинову суміш з заданою концентрацією ІПС. Після цього готова суміш завантажувалась в ємність (Є) та насосом (НВТ) подавалась на кавітаційну форсунку (Ф). Форсунка створює тиск на виході з сопла 9,0 МПа (контролюється манометром (Р1), а на виході з сопла форсунки утворюються кавітаційні каверни, що і є міні-реакторами, в яких відбуваються хімічні перетворення.

Кавітаційні каверни також утворюються при зіткненні крапель сировини зі стінками реактора та з конусоподібним відбійником. Швидкість зіткнення становить понад 140 м/с.

Один цикл кавітаційної обробки включає рух сировини по контуру «(Є)-(ТК)-(НВТ)-(Р)-(Ф)-(С)-(ТК)-(Є)». Кількість циклів кавітаційної обробки забезпечує досягнення сталого значення ОЧ за даних умов. Дегазована в сепараторі (С) суміш продуктів бензину та ІПС аналізується на показники RON та MON.

Вимірювання ОЧ сировини та продуктів здійснюється октанометром SHATOX SX-150 (Виробник: Інститут хімії нафти, м. Томськ, Росія, 2009 р. Постачальник: ТОВ Верітас, м. Миколаїв, Україна) Принцип роботи приладу полягає в визначенні антидетонаційної стійкості бензинів через вимірювання їх діелектричної проникності та питомого об'ємного опору. Метод контролю полягає в моделюванні електричних параметрів, еквівалентних електричним параметрам суміші, що аналізується. Прилад здатен вимірювати ОЧ (RON та MON) в діапазоні 40–135 пунктів із похибкою вимірювання ОЧ $\pm 0,5$ та відхиленням поміж паралельними вимірюваннями $\pm 0,2$. Час вимірювання складає 1–5 с. Значення RON та MON, отримані за допомогою цього приладу, відповідають стандартам ASTM D 2699-86, ASTM D 2700-86, EN 228-99.

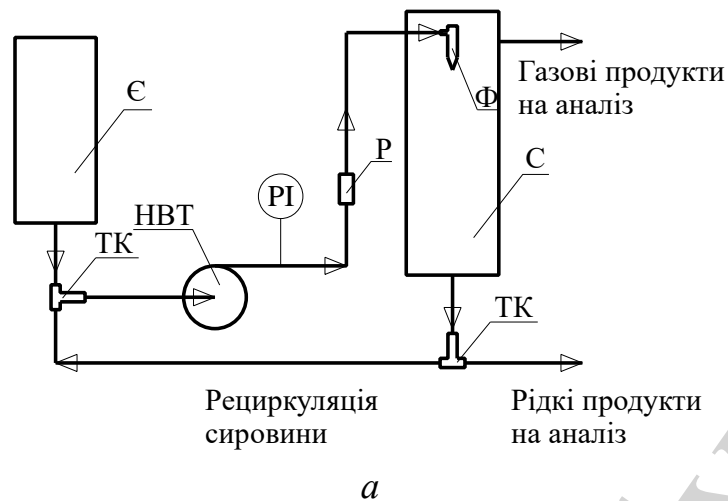


Рис. 1. Лабораторна установка для дослідження впливу кавітаційної обробки на ОЧ та склад газоконденсатного бензину із добавкою ІПС: *а* – схема установки; *б* – фотографія установки; Є – ємність із сировиною (суміш ГК-бензину та ІПС), С – ємність-сепаратор для продуктів, Ф – форсунка-реактор, що здійснює кавітаційну обробку сировини, НВТ – насос високого тиску, ТКР – триходовий клапан з функцією регулювання, ТК – триходовий клапан, PI – манометр, Р – регулятор витрати

5. Результати досліджень впливу інтенсивності кавітаційної обробки на ОЧ газоконденсатного бензину

Задачу із вивчення зміни октанового числа (RON та MON) від числа циклів кавітаційної обробки для різних концентрацій ІПС в газоконденсатному бензині вирішено через отримання експериментальних даних (табл. 1), де в стовпчиках 2–12 наведені фактичні показники ОЧ після проведення певної кількості циклів кавітаційної обробки.

Дослідження були зосереджені на пошуку концентрацій ППС та режимів кавітації, що підходять для підвищення RON до 95 та 98 пунктів. Дані значення RON відповідають показникам товарних марок бензинів А-95 та А-98.

Таблиця 1

Зміна (RON) та (MON) від кількості циклів кавітаційної обробки для газового конденсату із добавкою ППС

Оч	Кількість циклів кавітаційної обробки										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Газовий конденсат без добавки ППС											
RON	92,3	92,4	92,4	92,6	92,6	92,8	92,9	92,9	92,5	93,0	93,1
MON	83,3	83,5	83,5	83,7	83,7	83,7	83,8	83,8	83,8	83,8	83,8
Газовий конденсат із добавкою 0,5 % об. ППС											
RON	93,0	93,3	93,0	93,4	93,4	93,4	93,5	93,4	93,5	93,5	93,7
MON	83,8	83,8	83,8	83,8	83,8	83,8	83,9	83,8	83,9	83,9	83,9
Газовий конденсат із добавкою 1 % об. ППС											
RON	93,2	93,8	93,8	93,8	93,7	93,9	93,6	94,0	94,0	94,2	94,1
MON	83,8	84,0	84,0	84,0	83,9	84,0	83,9	84,0	84,1	84,2	84,1
Газовий конденсат із добавкою 1,5 % об. ППС											
RON	94,0	93,9	94,1	94,2	94,2	94,4	94,4	94,5	94,2	94,5	94,6
MON	84,1	84,0	84,1	84,2	84,2	84,4	84,4	84,5	84,2	84,5	84,6
Газовий конденсат із добавкою 2 % об. ППС											
RON	94,6	94,6	94,7	94,7	94,7	94,7	94,8	94,9	94,9	94,9	95,0
MON	84,6	84,6	84,7	84,7	84,7	84,7	84,8	84,9	84,9	84,9	85,0
Газовий конденсат із добавкою 2,5 % об. ППС											
RON	94,9	94,9	94,8	95,0	95,0	95,0	95,0	95,1	95,5	95,7	95,8
MON	84,9	84,9	84,8	85,0	85,0	85,0	85,0	85,1	85,5	85,7	85,8
Газовий конденсат із добавкою 3 % об. ППС											
RON	95,0	95,0	95,1	95,1	95,4	95,1	95,4	95,6	95,7	95,8	95,9
MON	85,0	85,0	85,1	85,1	85,4	85,1	85,4	85,6	85,7	85,8	85,9
Газовий конденсат із добавкою 3,5 % об. ППС											
RON	94,9	95,3	95,5	95,7	95,7	95,8	95,8	95,8	95,8	95,8	95,8
MON	84,9	85,3	85,5	85,7	85,7	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8
Газовий конденсат із добавкою 4,0 % об. ППС											
RON	95,8	96,0	96,1	96,1	96,2	96,2	96,2	96,2	96,3	96,4	96,3
MON	85,8	86,0	86,1	86,1	86,2	86,2	86,2	86,2	86,4	86,5	86,3
Газовий конденсат із добавкою 5,0 % об. ППС											
RON	96,5	96,5	96,7	96,7	96,8	97,0	97,1	97,0	97,1	97,0	97,1
MON	86,7	86,8	87,1	87,1	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2	87,2
Газовий конденсат із добавкою 7,0 % об. ППС											
RON	97,6	97,9	97,9	98,0	98,0	98,1	98,1	98,1	98,2	98,3	98,5
MON	87,6	87,9	87,9	88,0	88,0	88,1	88,1	88,1	88,3	88,4	88,7
Газовий конденсат із добавкою 10,0 % об. ППС											
RON	101,5	101,7	101,7	101,8	102,0	102,0	102,0	102,1	102,2	102,2	102,1
MON	91,2	91,4	91,4	91,5	91,7	91,7	91,7	91,7	91,9	91,9	91,7
Газовий конденсат із добавкою 12,0 % об. ППС											
RON	104,3	104,2	104,3	104,3	104,4	104,5	104,5	104,6	104,6	104,6	104,5
MON	93,8	93,7	93,8	93,8	93,9	94,0	94,0	94,1	94,1	94,1	94,0

Задачу із вивчення впливу кавітації на приріст ОЧ для суміші газоконденсатного бензину з ІПС в різних концентраціях вирішено через порівняння досягнутого приросту (RON) та (MON) з початковими показниками. Дані наведені в табл. 2. В якості сталих показників (RON) та (MON) прийняті значення ОЧ, які не змінюються після 7–8 і більше циклів кавітаційної обробки на форсунці із тиском 9,0 МПа.

Таблиця 2

Показники (RON) та (MON) до і після кавітаційної обробки в залежності від вмісту ІПС в газовому конденсаті

№	Вміст ІПС, % об.	RON		MON		Приріст ОЧ, пунктів	
		До	Після	До	Після	RON	MON
1	0	92,3	92,88	82,3	82,8	0,58	0,50
2	0,5	93,0	93,53	83,8	83,88	0,53	0,08
3	1,0	93,2	94,08	83,8	84,1	0,88	0,3
4	1,5	94,0	94,45	84,1	84,45	0,45	0,35
5	2,0	94,6	94,93	84,6	84,43	0,33	0,33
6	2,5	94,9	95,53	84,9	85,53	0,63	0,63
7	3,0	95,0	95,75	85,0	85,75	0,75	0,75
8	3,5	94,9	95,8	84,9	85,8	0,9	0,9
9	4,0	95,8	96,3	85,8	86,35	0,5	0,55
10	5,0	96,5	97,05	86,7	87,2	0,55	0,5
11	7,0	97,6	98,28	87,6	88,38	0,68	0,78
12	10,0	101,5	102,15	91,2	91,8	0,65	0,6
13	12,0	104,3	104,58	93,8	94,08	0,27	0,27

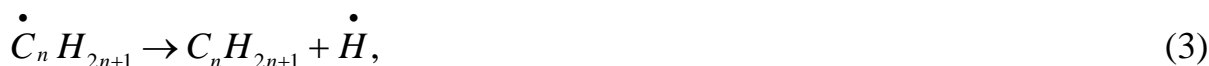
Після певної кількості циклів кавітаційної обробки досягалось стаке значення (RON) та (MON), яке в наступних циклах вже не змінювалось при цьому тиску на форсунці. Для добавки ізопропанолу достатньою є 7–8 циклів кавітаційної обробки в інтервалі концентрацій ІПС від 0,5 до 12,0 % об. при тиску на форсунці 9,0 МПа.

6. Аналіз експериментальних даних та порівняння результатів із даними попередніх досліджень

Наведені в табл. 1 результати свідчать, що додавання ІПС призводить до підвищення (RON) та (MON) у всьому інтервалі проведених досліджень. При збільшенні числа циклів кавітаційної обробки значення (RON) та (MON) спочатку збільшуються, досягають певного значення та залишаються сталими при подальших циклах кавітаційної обробки. Тобто існує деяка кількість внесеної в систему енергії, за якої досягається рівноважний стан системи. Скоріш за все при цьому встановлюються рівноважні концентрації речовин.

В роботі [14] наведений склад спирт-бензинової суміші до і після кавітаційної обробки, а також запропоновано схему хімічних перетворень, що пояснює наявність в складі біоетанол-бензинової суміші етерів. Аналогічну схему

можна запропонувати і для пояснення наявності етерів та олефінів в ізопропанол-газоконденсатній суміші. До збільшення ОЧ суміші призводять наступні реакції: крекінг вуглеводнів (1), (2), утворення олефінів, ізоолефінів, ізопарафінів (3)–(5), утворення етерів (6).



Дані реакції – лише частина від всіх реакцій радикально-ланцюгових перетворень. Хроматографічний аналіз спирт-бензинових сумішей показує збільшення частки ненасичених сполук та ізомерів із одночасним зменшенням н-парафінів, а також збільшення кількості етерів та інших кисневмісних сполук.

Задачу із надання рекомендацій щодо технологічних режимів кавітаційної обробки для виробництва товарних бензинів марок А-95, А-98 з газового конденсату та ІПС було вирішено через створення системи рівнянь регресії, що пов'язують показники RON із концентрацією ІПС в спирт-бензиновій суміші за різних режимів кавітаційної обробки.

Вплив інтенсивності кавітаційної обробки на показник (RON) добре спостерігається на рис. 2. У всьому дослідженому інтервалі концентрацій ІПС при збільшенні числа циклів кавітаційної обробки збільшується показник ОЧ. Чим більш висока концентрація ІПС в бензині, тим менш помітним стає вплив кавітації на приріст ОЧ. В діапазоні концентрацій ІПС від 0 до 7,0 % об. залежність ОЧ від концентрації ІПС $RON = f(C_{\text{ІПС}})$ можна представити у вигляді рівнянь регресії: для простого механічного змішування ІПС та газоконденсатного бензину – рівняння 7; для 1 циклу кавітаційної обробки – рівняння 8; для 5 циклів кавітаційної обробки – рівняння 9; для 7–10 циклів кавітаційної обробки – рівняння 10.

$$RON = 0,0109 \cdot C_{\text{ІПС}}^3 - 0,1491 \cdot C_{\text{ІПС}}^2 + 1,2679 \cdot C_{\text{ІПС}} + 92,32, \quad (7)$$

$$\text{RON} = 0,012 \cdot C_{\text{ПС}}^3 - 0,1467 \cdot C_{\text{ПС}}^2 + 1,2077 \cdot C_{\text{ПС}} + 92,562, \quad (8)$$

$$\text{RON} = 0,0014 \cdot C_{\text{ПС}}^3 - 0,0375 \cdot C_{\text{ПС}}^2 + 0,9397 \cdot C_{\text{ПС}} + 92,909, \quad (9)$$

$$\text{RON} = 0,014 \cdot C_{\text{ПС}}^3 - 0,1712 \cdot C_{\text{ПС}}^2 + 1,2913 \cdot C_{\text{ПС}} + 93,069. \quad (10)$$

За допомогою рівнянь (7)–(10) можна обчислити необхідну концентрацію ПС для досягнення показників RON в 95 та 98 пунктів за різної інтенсивності кавітаційної обробки.

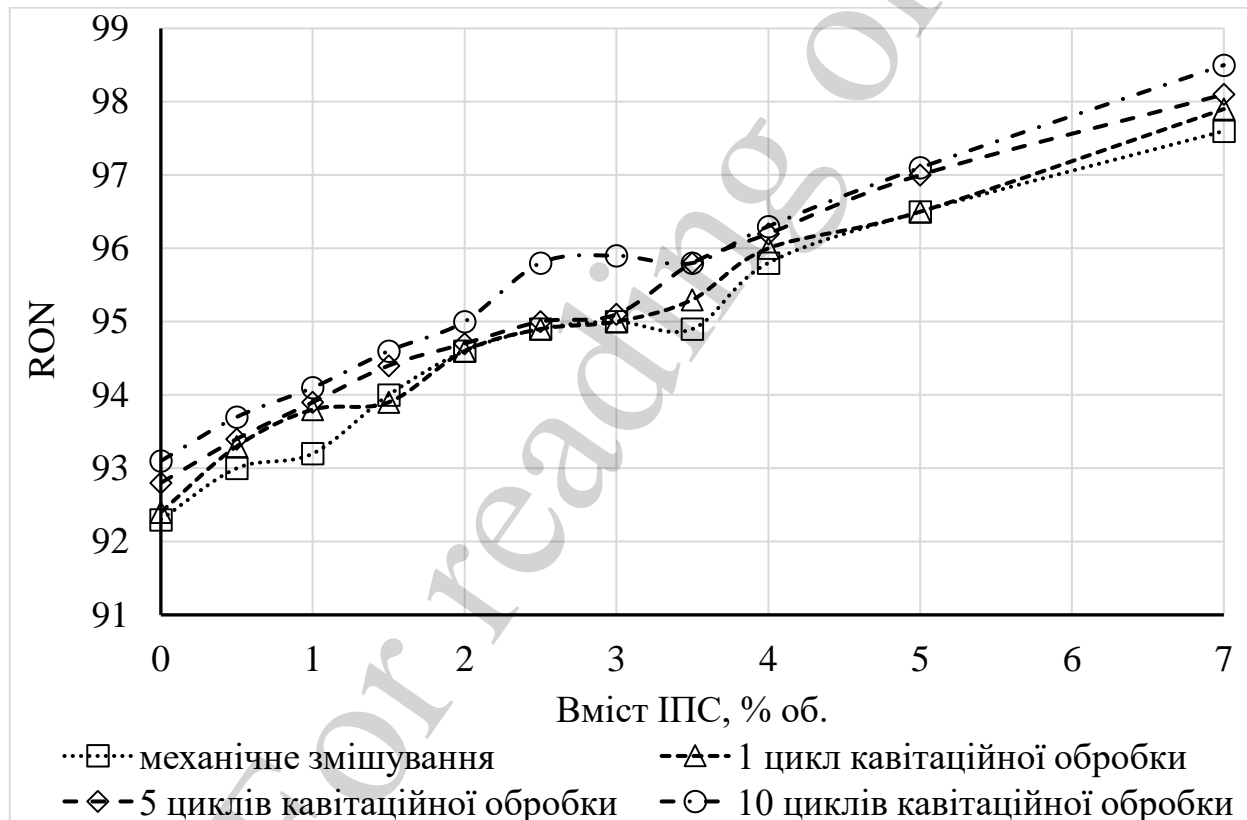


Рис. 2 Порівняння впливу інтенсивності кавітаційної обробки на (RON) газоконденсатного бензину при різних концентраціях добавки ПС

Задачу із порівняння витрати ПС на виробництво товарних марок бензинів А-95 та А-98 при механічному змішуванні та при кавітаційній обробці спирт-бензинової суміші вирішено через співставлення даних з табл. 1. Після 7–8 циклів кавітаційної обробки (табл. 1) досягається стає значення (RON) та (MON), яке не збільшується при проведенні 10 циклів обробки і більше. На рис. 2 можна побачити, що 3 % об. ПС достатньо для створення показника (RON) 95 пунктів при механічному змішуванні газоконденсатного бензину та

ІПС, що є достатнім для виробництва бензину товарної марки А-95 згідно ДСТУ 7687:2015. Застосування кавітаційної обробки (більше 7 циклів за тиску на форсунці 9,0 МПа) дозволяє зменшити кількість ІПС, достатню для досягнення показника (RON) 95 пунктів, до 2,5 % об.

Практично аналогічною є ситуація, із досягненням показника (RON) 98 пунктів. При механічному змішуванні потрібно додавання ІПС в кількості 8,1 % об. (рис. 2), а застосування кавітації в кількості 4–7 циклів дозволяє зменшити кількість ІПС до 7,0 % об. Екстраполяція результатів на масштаб промислової установки показує, що використання кавітації зменшить витрати на сировину – ІПС – на 17 %. Необхідна кількість ІПС в суміші зменшиться з 3,0 % об. до 2,5 % об. при виробництві бензину марки А-95. Для виробництва бензину марки А-98 скорочення становитиме 14 % – 8,1 % об. до 7,0 % об.

Вирішення задачі із вивчення впливу кавітації на приріст ОЧ для суміші газоконденсатного бензину з ІПС доповнене візуалізацією даних із табл. 2 на рис. 3.

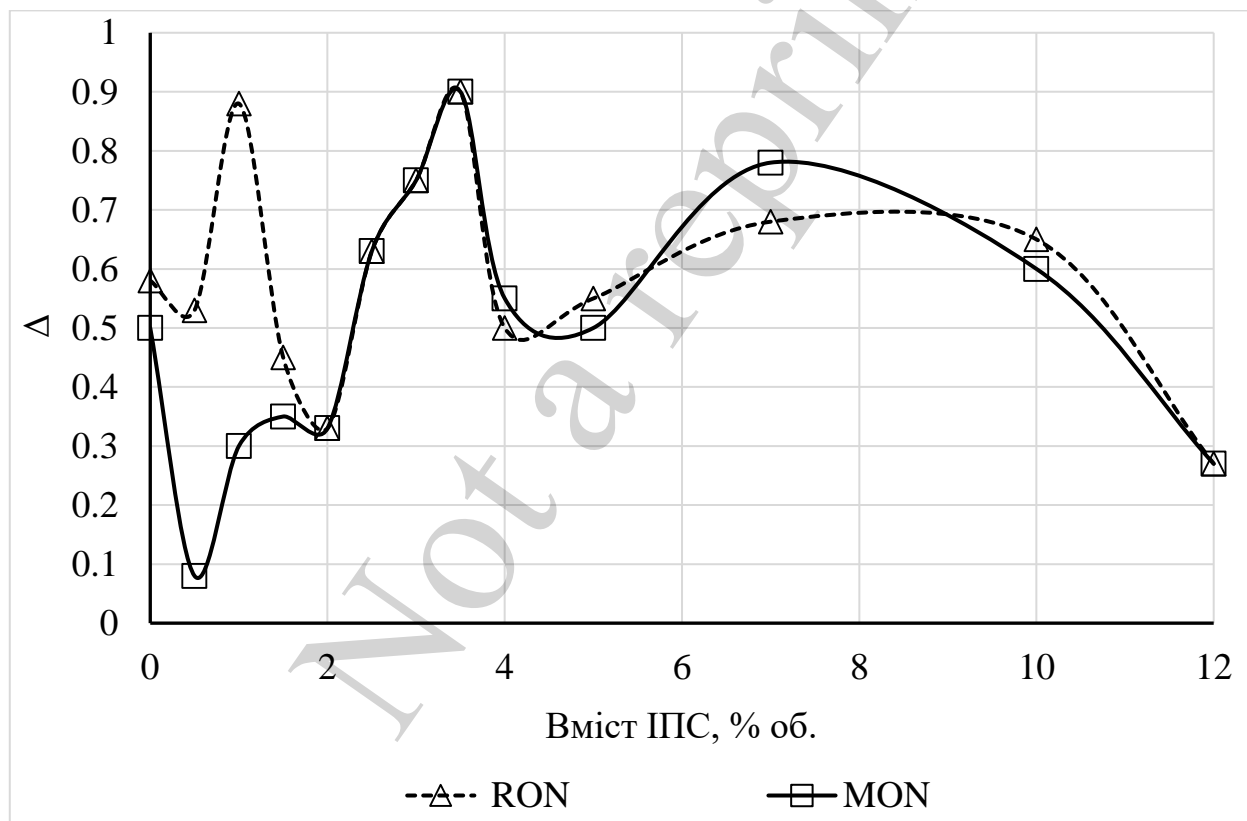


Рис. 3. Вклад кавітаційної обробки в приріст показників (RON) та (MON) за різних концентрацій ІПС в газоконденсатному бензині

Можна відмітити, що залежність має нелінійний характер з декількома максимумами при певних концентраціях – 1,0 % об. та 3,5 % об. та 7,0 % об. ІПС для показнику (RON) і 3,5 % об. та 7,0 % об. ІПС для показнику (MON). Аналогічні залежності спостерігались і при вивченні впливу кавітації на ОЧ бензину, модифікованого біоетанолом, але там був один виражений максимум – при концентрації біоетанолу на рівні 1,0 % об. Наявність таких максимумів можна

пояснити зміною співвідношення швидкостей хімічних реакцій різних типів, що одночасно відбуваються в спирт-бензиновій суміші при її кавітаційній обробці. Існують деякі оптимальні концентрації спирту, при яких вплив кавітації на хімічні перетворення, масообмін, ОЧ та інші характеристики бензинів набуває резонансного характеру. При цьому певні характеристики досягають максимальних значень.

Слід відмітити що явище резонансного впливу інтенсивності механічної активації, до яких відноситься кавітація, спостерігалось і для других технологій, що використовують механічні способи селективного підведення енергії до реакційних центрів. Наприклад, в методі, відомому як «аерозольний нанокаталіз» [15], відбувається активація та утворення постійної концентрації аерозолу гіперактивних каталітичних частинок через зміну частоти коливань каталітичної системи, що складається з порошку каталізатора початковими розмірами до 200 мкм та диспергуючого цей каталізатор матеріалу з розмірами до 1,2 мм. Проведені дослідження різноманітних процесів переробки вуглеводнів цим методом показали наявність аномальних максимальних залежностей ефективної константи швидкості реакцій крекінгу за певних частот коливань каталітичної системи, а також зміну виходу окремих продуктів.

Для кавітаційної обробки явище резонансу можна пояснити через створення оптимальної концентрації активованих частинок. При цьому швидкість витрачання активованих частинок за цільовими реакціями перевищує швидкість витрачання за побічними реакціями. Для дослідженого газоконденсатного бензину створення товарної марки бензину А-95 можливе при додаванні 2,0–3,5 % об. ІПС та інтенсивності кавітаційної обробки 0-8 циклів при тиску на форсунці 9,0 МПа. Для виробництва товарної марки бензину А-98 необхідне додавання 6,0–8,5 % об. ІПС та інтенсивність кавітаційної обробки 0-8 циклів при аналогічному тиску на форсунці.

При подальшому зростанні концентрації відбувається прискорення нецільових реакцій, наприклад, реакцій отримання н-алканів та реакцій ущільнення.

Рис. 3 ілюструє можливість встановлення оптимальних концентрацій спирту, за яких технологія кавітаційної обробки сировини дає максимальний ефект. Початкове ОЧ бензинової фракції можна змінювати через компаундування його з високооктановими фракціями. Подальше додавання ІПС або інших спиртів дозволить організувати процес отримання бензинів А-95, А-98 з мінімальними енерговитратами.

7. Обговорення результатів дослідження впливу інтенсивності кавітації на ОЧ бензинів, модифікованого ІПС

Проведені дослідження показали ефективність застосування кавітації для збільшення ОЧ газоконденсатного бензину із добавкою ІПС. Збільшення RON на 12 пунктів і зростання MON на 10,5 пунктів при змінненні концентрації ІПС з нуля до 12 % об'ємних є очікуваним. Воно пропорційне концентрації спирту. Але застосування кавітації дає додатковий ефект в 0,3–0,9 пункти в залежності від концентрації ІПС та інтенсивності кавітаційної обробки. Поясніть це можна зміною хімічного складу модифікованого бензину. Хроматографічний аналіз

показує збільшення вмісту олефінів, ізоалканів, ізоолефінів, етерів в спирт-бензиновій суміші до 0,5 % об. сумарно в порівнянні із складом суміші, яка не піддавалась кавітаційній обробці. Саме вони дають додатковий приріст ОЧ. Зростання ОЧ бензину при різних концентраціях ІПС (рис. 2).

Але збільшення кавітації дозволяє збільшувати ОЧ не лінійно, а резонансно. На рис. 3 добре видно резонансний характер впливу інтенсивності кавітації на ОЧ. Такий характер впливу можна пояснити різним співвідношенням швидкостей цільових та побічних реакцій при різних концентраціях ІПС.

Підвищення ОЧ через додавання спирту є добре відомою технологією. Але ще ніколи в одному технологічному процесі не поєднували змішування ІПС із бензином та кавітаційну обробку. На відміну від робіт [1, 3, 9, 10], де вдалось досягти хімічних перетворень вуглеводнів та зменшення в'язкості важких нафтопродуктів, ця робота показала можливість підвищення ОЧ бензинів.

Вплив кавітації на характеристики палива є тільки позитивним. Інтенсивна механохімічна активація сировини призводить до збільшення вмісту олефінів, що знижує стабільність бензину. Такий бензин буде мати менший строк зберігання без втрати властивостей. Але переваги від збільшення ОЧ переважають цей недолік.

Отримані результати можуть бути масштабовані на процеси модифікації газоконденсатних бензинових фракцій із початковим ОЧ не більше 92 пунктів за дослідницьким методом. Для коректного масштабування та оптимізації процесу по витратам спирту та по енерговитратам в виробництві товарних марок бензину А-95 та А-98 кількість добавки ІПС до спирт-бензинової суміші не повинна перевищувати 12 % об'ємних. Тиск на кавітаційній форсунці повинен становити 9,0 МПа, а кількість циклів кавітаційної обробки за цих умов не перевищує 10. За більшої кількості циклів можлива інтенсифікація нецільових реакцій ущільнення та коксоутворення.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення впливу кавітаційної обробки при модифікації бензинів більш високомолекулярними спиртами та сумішами спиртів. Планується також вивчення впливу тиску на кавітаційній форсунці на ОЧ спирт-бензинових сумішей та на їх хімічний склад

8. Висновки

1. Встановлено, що сталі значення (RON) та (MON) для газоконденсатного бензину, модифікованого ІПС, досягається за 7–8 циклів кавітаційної обробки при концентрації ІПС в суміші 0,5–12 % об'ємних. Це дає можливість оптимізувати технологічний режим в бік зменшення енерговитрат для майбутньої промислової установки кавітаційної обробки спирт-бензинових сумішей.

2. Встановлено, що вплив концентрації ІПС на ОЧ модифікованого бензину в умовах кавітаційної обробки має нелінійний характер з декількома максимумами при певних концентраціях – 1,0 % об. та 3,5 % об. та 7,0 % об. ІПС для показнику (RON) і 3,5 % об. та 7,0 % об. ІПС для показнику (MON). Варіюванням початкової концентрації ІПС та ОЧ бензинової фракції можна оптимізувати технологічний режим виробництва бензинів А-95 та А-98 за витратами сировини та за енерговитратами.

3. Доказано, що створення товарної марки бензину А-95 можливе при додаванні 2,0–3,5 % об. ІПС та інтенсивності кавітаційної обробки 0–8 циклів при тиску на форсунці 9,0 МПа. Для виробництва товарної марки бензину А-98 необхідне додавання 6,0–8,5 % об. ІПС та інтенсивність кавітаційної обробки 0–8 циклів при аналогічному тиску на форсунці.

4. Використання кавітаційної обробки дозволить зменшити витрати на сировину – ІПС – на 17 % (з 3,0 % об. до 2,5 % об.) при виробництві бензину марки А-95; на 14 % (з 8,1 % об. до 7,0 % об.) при виробництві бензину марки А-98.

Література

1. Kaushik, P., Kumar, A., Bhaskar, T., Sharma, Y. K., Tandon, D., Goyal, H. B. (2012). Ultrasound cavitation technique for up-gradation of vacuum residue. *Fuel Processing Technology*, 93 (1), 73–77. doi: <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.09.005>
2. Askarian, M., Vatani, A., Edalat, M. (2016). Heavy oil upgrading in a hydrodynamic cavitation system: CFD modelling, effect of the presence of hydrogen donor and metal nanoparticles. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 95 (4), 670–679. doi: <http://doi.org/10.1002/cjce.22709>
3. Wan, C., Wang, R., Zhou, W., Li, L. (2019). Experimental study on viscosity reduction of heavy oil by hydrogen donors using a cavitating jet. *RSC Advances*, 9 (5), 2509–2515. doi: <http://doi.org/10.1039/c8ra08087a>
4. Price, R. J., Blazina, D., Smith, G. C., Davies, T. J. (2015). Understanding the impact of cavitation on hydrocarbons in the middle distillate range. *Fuel*, 156, 30–39. doi: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.04.026>
5. Cui, J., Zhang, Z., Liu, X., Liu, L., Peng, J. (2020). Analysis of the viscosity reduction of crude oil with nano-Ni catalyst by acoustic cavitation. *Fuel*, 275, 117976. doi: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117976>
6. Barletta, T. (2003). Pump cavitation caused by entrained gas. *Hydrocarbon Processing*, 82 (11), 69–72. Available at: https://www.researchgate.net/publication/282720713_Pump_cavitation_caused_by_entrained_gas
7. Промтов, М. А. (2017). Изменение фракционного состава нефти при гидроимпульсной кавитационной обработке. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, 23 (3), 412–419. doi: <http://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.412-419>
8. Nesterenko, A. I., Berlizov, Y. S. (2012). Modeling of the influence of cavitation on petroleum hydrocarbon cracking. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 48 (1), 49–58. doi: <http://doi.org/10.1007/s10553-012-0336-1>
9. Sawarkar, A. N. (2019). Cavitation induced upgrading of heavy oil and bottom-of-the-barrel: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104690. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104690>
10. Avvaru, B., Venkateswaran, N., Uppara, P., Iyengar, S. B., Katti, S. S. (2018). Current knowledge and potential applications of cavitation technologies for the petroleum industry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 42, 493–507. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.12.010>

11. Лаврова, І., Саїд, В. (2013). Дослідження впливу технологічних факторів на ефективність процесу кавітаційної обробки нафтопродуктів. Східно-Європейський журнал передових технологій, 6 (6 (66)), 43–47. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.19210>
12. Kravchenko, O., Suvorova, I., Baranov, I., Goman, V. (2017). Hydrocavitation activation in the technologies of production and combustion of composite fuels. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (5 (88)), 33–42. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108805>
13. Бойченко, С., Ланецький, В., Черняк, Л., Радомська, М., Кондакова, О. (2017). Дослідження впливу кавітаційної обробки на октанове число автомобільного бензину. Енергетика: економіка, технології, екологія, 2, 107–114. doi: <http://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2017.111693>
14. Tselishchev, A., Loriya, M., Boychenko, S., Kudryavtsev, S., Laneckij, V. (2020). Research of change in fraction composition of vehicle gasoline in the modification of its biodethanol in the cavitation field. Eureka: Physics and Engineering, 5, 12–20. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001399>
15. Leonenko, S., Kudryavtsev, S., Glikina, I. (2017). Study of catalytic cracking process of fuel oil to obtain components of motor fuels using aerosol nanocatalysis technology. Adsorption Science & Technology, 35 (9-10), 878–883. doi: <http://doi.org/10.1177/0263617417722253>

Not a repository