УДК 534.8:665.6 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.4

Р. О. БОНДАР
аспірант кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0008-9383-4130

І. А. ГРИШКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-5709-1359

УСТАНОВКА ДЛЯ КАВІТАЦІЙНОГО ГІДРУВАННЯ ВАЖКИХ НАФТОПРОДУКТІВ

У статті висвітлено етапи створення установки для кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів на базі ультразвукового трубчастого кавітатора. Ця установка забезпечує ефективну переробку важких нафтопродуктів, включаючи мазути та парафінові фракції, отримуючи 100 % товарної продукції за декілька циклів, що дозволяє знизити енергетичні витрати та підвищити вихід світлих фракцій, таких як бензин і дизель. Особливістю технології є концентрація ультразвукової енергії в центральній частині циліндричної кавітаційної камери, яка сприяє розриву молекулярних зв'язків та ефективному розщепленню молекул вуглеводнів.

Запропоноване рішення дає змогу зменшити негативний вплив на довкілля та покращити економічні показники процесу переробки. Проведено аналіз недоліків існуючих методів, таких як каталітичне розщеплення, термохімічний метод і зневоднення із подальшим захороненням сухих залишків, що підкреслює переваги кавітаційного методу. Також створено систему фракційної перегонки рідини, яка дозволяє розділити компоненти нафтопродуктів (бензин, газ, дизель) в лабораторних умовах, забезпечуючи оперативне регулювання параметрів процесу.

Методика створення установки базується на технологіях з використанням ультразвукової енергії та кавітаційних процесах. Це забезпечує високу ефективність розщеплення вуглеводневих молекул навіть для важких нафтопродуктів. Описано принципи роботи ультразвукового крекінгу, наведено гідравлічні схеми та конструктивні особливості установки.

Застосування даної технології сприятиме вирішенню проблем обмежених ресурсів традиційної нафти та дозволяє оптимізувати процес переробки важких нафтопродуктів з екологічної та економічної точки зору. Особливу увагу приділено перспективам оптимізації процесу регулювання подачі водневого газу та часу дії ультразвукової кавітації, а також контролю тиску та температури з метою виходу якомога більшої кількості світлих фракції обробленого нафтопродукту.

Ключові слова: *переробка важких нафтопродуктів, кавітаційне гідрування, важкі нафтопродукти, ультразвуковий трубчастий кавітатор, розщеплення вуглеводнів, фракційна перегонка, переробка нафти, ультразвук, кавітація, переробка нафти.*

R. O. BONDAR
Postgraduate Student at the Department of Applied Hydroaeromechanics and Mechatronics
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0008-9383-4130

I. A. HRYSHKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Applied Hydroaeromechanics and Mechatronics
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-5709-1359

QUIPMENT FOR CAVITATION HYDROGENATION OF HEAVY PETROLEUM PRODUCTS

The article highlights the stages of creating a setup for cavitation hydrogenation of heavy petroleum products based on an ultrasonic tubular cavitator. This setup ensures the efficient processing of heavy petroleum products, including fuel oils and paraffin fractions, achieving 100 % marketable products within several cycles. This allows for reduced

energy consumption and increased yields of light fractions, such as gasoline and diesel. A key feature of the technology is the concentration of ultrasonic energy in the central part of the cylindrical cavitation chamber, which promotes the breaking of molecular bonds and the effective cracking of hydrocarbon molecules.

The proposed solution reduces the environmental impact and improves the economic performance of the processing operation. An analysis of the shortcomings of existing methods, such as catalytic cracking, thermochemical methods, and dewatering with subsequent burial of dry residues, emphasizes the advantages of the cavitation method. A system for fractional distillation of liquids was also developed, enabling the separation of petroleum product components (gasoline, kerosene, diesel) under laboratory conditions, ensuring the ability to adjust process parameters in real-time.

The methodology for creating the setup is based on technologies utilizing ultrasonic energy and cavitation processes. This ensures high efficiency in the cracking of hydrocarbon molecules, even for heavy petroleum products. The principles of ultrasonic cracking are described, along with hydraulic schemes and design features of the setup.

The application of this technology will help address the challenges posed by limited traditional oil resources and allows for optimizing the processing of heavy petroleum products from both ecological and economic perspectives. Special attention is given to the prospects of process optimization through regulating the supply of hydrogen gas, the duration of ultrasonic cavitation exposure, and controlling pressure and temperature to maximize the yield of light fractions from the treated petroleum product.

Key words: *refining of heavy petroleum products, cavitation hydrogenation, heavy petroleum products, ultrasonic tubular cavitator, hydrocarbon splitting, fractional distillation, petroleum refining, ultrasonic, cavitation, petroleum refining.*

Постановка проблеми

Економічний розвиток та зростання населення за останні десятиліття спричинили підвищення попиту на викопне паливо. Як результат відбулось зменшення запасів так званої «традиційної» нафти, включно з легкою та середньою в'язкістю. Їх стає дедалі менше та є недостатніми для задоволення постійно зростаючих потреб у паливних та енергетичних ресурсах. Нетрадиційні запаси нафти, що включають надважку нафту, важку високов'язку нафту (ННО), горючі сланці, бітуми та нафтові піски, слугують альтернативою викопному паливу. Передбачають, що в майбутньому важкі та надважкі нафти стануть альтернативою звичайним нафтам, проте зважаючи на їх хімічний склад і фізико-хімічні властивості, необхідно вирішити ряд проблем, які пов'язані з їх видобутком, подальшим транспортуванням на заводи з нафтопереробки та подальші шляхи їх раціональної обробки [1, 2]. Важкою нафтою називають суміш рідких вуглеводнів, що характеризується щільністю 860–1000 кг/м^3 та має в'язкість 10–100 МПа·с. Поклади важкої нафти залягають на глибинах від 300 м до більш ніж 1500 м. Також їм притаманні високий вміст смолисто-асфальтенових речовин, ароматичних вуглеводнів та висока концентрація металів і сполук сірки [3, 4]. Дані показники спричиняють збільшення собівартості виробництва, а також збільшують складність та вартість транспортування сировини існуючими нафтопроводами та ускладнення переробки нафтопродуктів за класичними схемами [3, 4].

Кількість світових запасів важкої нафти (рис. 1) за оцінкою геологічної служби США складає 434 мільярди барелів. Найбільші ресурси важких високов'язких нафт знаходиться на території Північної та Південної Америки, а також на Близькому Сході [5, 6].

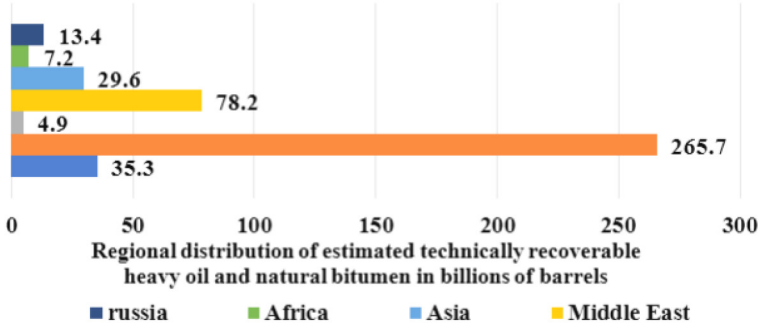


Рис. 1. Оцінка запасів важкої нафти у світі [5, 6]

Багато промислово розвинутих країн світу вважають важку нафту основною для розвитку нафтовидобутку в майбутньому. Так як в найближчі роки буде відбуватись видобування все більшої кількості важкої нафти, актуальності набуває і розвиток надійних технологій, що впливає на реологічні властивості сирої нафти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день існують методи переробки мазуту, що є одним з видів важких нафтопродуктів, зокрема каталітичне розщеплення, термохімічний метод, зневоднення з подальшим захороненням сухих залишків. Проте дані методи мають ряд недоліків [7].

Недоліки каталітичного розчеплення:

1. Високі витрати на обладнання [8].
2. Складність керування процесом. Дані методи потребує керування різними параметрами, такими як температура, тиск, склад та розмір каталізатора, що впливають на якість та кількість отриманого палива [8].
3. В процесі каталітичного розщеплення мазуту може виділятись велика кількість тепла, а також шкідливі речовини, які можуть створювати небезпеку для робочого персоналу і навколишнього середовища [8, 9].
4. Обмеженість використання. Каталітичне розщеплення мазуту застосовується виключно на важких мазутах, так як процес може бути неефективним для легких нафтопродуктів, що обмежує використання даного методу для отримання палива [8].

Недоліки термохімічного методу:

1. Для забезпечення високих тисків, температур та інших параметрів процесу термохімічної переробки мазуту необхідне значне споживання електроенергії [10].
2. Даний метод переробки мазуту має значний негативний вплив на довкілля через велику кількість викидів парникових газів [11].
3. Під час переробки мазуту виникає значна кількість відходів, що вимагає додаткових зусиль для їхньої обробки та утилізації [12].
4. Даний метод переробки мазуту може створювати небезпечні умови праці для співробітників, які працюють на заводах з переробки, у зв'язку з високими температурами та рядом інших факторів [12].

Недоліки зневоднення мазуту з подальшим захороненням сухих залишків:

1. Під час зневоднення досить часто виникають технічні проблеми, такі як засмічення обладнання чи проблеми з управлінням вологою та температурою [13].
2. Мазут, що містить велику кількість сірки, є небезпечним для довкілля та здоров'я людей. При зневодненні мазуту, зменшення вологості збільшує концентрацію сірки в мазуті, що може вплинути на довкілля, особливо при його захороненні [14].
3. При захороненні виникають певні ризики викиду забруднювальних речовин в атмосферу, що впливають на здоров'я людей та навколишнє середовище [15, 16].
4. Зневоднення мазуту є менш економічно ефективним порівняно з іншими методами переробки, особливо при високих витратах на енергію та обладнання [17].

Важливим загальним недоліком є відсутність переробки важких нафтопродуктів у 100 % товарну продукцію [18].

Формулювання мети дослідження

Метою є розробка установки, яка дозволяє отримувати високий відсоток світлих фракцій з важких нафтопродуктів, шляхом їх переробки методом кавітаційного гідрування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Також існує метод кавітаційного гідрування, який вирішує проблему переробки важких нафтопродуктів у 100 % товарну продукцію за декілька циклів. Одним з таких прикладів є установка для ультразвукового крекінгу вуглеводневих сполук розроблена Войтовичем О. В. Установка для ультразвукового крекінгу вуглеводневих сполук складається з корпусу, який виконаний з можливістю здійснення кавітаційного процесу у вуглеводневій сировині, акустичних ультразвукових випромінювачів у порожнині установки (реактора), вертикальної мішалки (ротаційного змішувача) з метою забезпечення гідродинаміки псевдозрідженого шару потоку в реакторі, пристрою для подачі вуглеводневої сировини у зону реакції, пристрою для відбору і виведення цільового продукту. Також до установки входять контейнер для каталізатора та каталізатор, що розміщений у контейнері в зоні кавітуючого потоку (у верхній частині реактора) у псевдозрідженому вихровому шарі каталізатора. Оснащена пристроями, що дозволяють реалізувати зміну швидкості обертання мішалки, пристроями з метою подачі водневмісних речовин і їх змішування з вуглеводневими сполуками. Сам корпус виконано у вигляді подовженого циліндра, який встановлений вертикально і забезпечений двома торцевими кришками, які забезпечують вакуумну щільність. У верхній торцевій кришці передбачені отвори для установки акустичних ультразвукових випромінювачів, а в нижній для встановлення пристроїв, що реалізують подачу водневмісних речовин, вуглеводневої сировини та їх змішування. Схема данох установки представлена на рисунку 2 [19].

Спираючись на актуальність теми та перспективи методу кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів, було прийняте рішення реалізувати дану технологію з використанням трубчастого кавітатора (рис. 3), який має більшу область обробки рідини та високу інтенсивність ультразвукових коливань [20], що є одним з основних факторів, який дозволяє здійснити розрив молекулярних зв'язків нафтопродуктів

Даний кавітатор дозволяє здійснити концентрацію ультразвукової енергії у центральній частині циліндричної камери, що наочно показано на рисунку 4. Також шляхом підвищення напруги збудження резонансних п'єзоелектричних приводів здійснюється підвищення інтенсивності коливань, відповідно кавітаційна область поступово розширюється. При подальшому збільшені амплітуди коливань відбувається розширення кавітаційної області до внутрішньої поверхні камери [20].

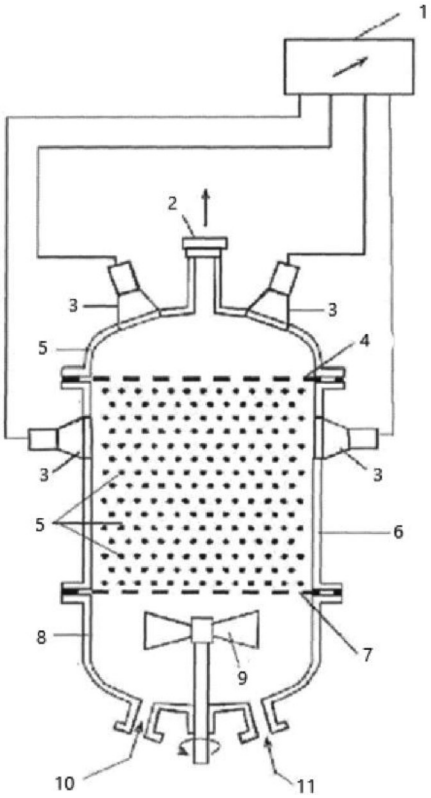
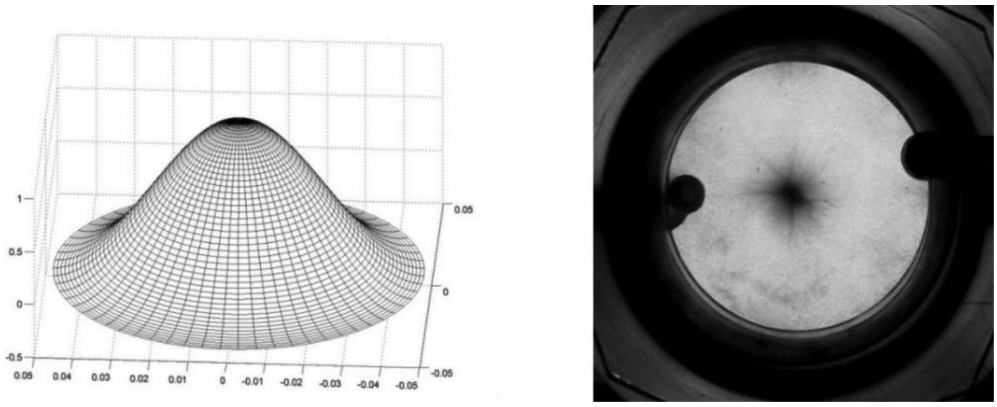


Рис. 2. Схема установки (1 – блок керування випромінювачем, 2 – вихідний отвір з реактора, 3 – ультразвукові випромінювачі, 4 – сітка фільтра верхнього, 5 – каталізатор, 6 – реактор, 7 – сітка фільтра нижнього, 8 – дно реактора, 9 – багатолопатевий ротаційний змішувач, 10 – вхід для вуглеводневої сировини, 11 – вхід для газової добавки) [19]

Рис. 3. Ультразвуковий трубчастий кавітатор [20]

Виходячи зі схеми установки розробленої Войтовичем О.В. та принципу роботи технології кавітаційного гідрування в розроблювальному нами стенді, окрім трубчастого ультразвукового кавітатора, необхідно передбачити трубопровід для подачі водневого газу через регулятор витрати (РВ) та місця для подачі оброблюваного нафтопродукту через горловину (Г) та кран (КР1) до кавітаційної камери (К) та зливу рідини після обробки через кран (КР2) [19]. Також слід зазначити, що під час впливу ультразвукової кавітації на оброблювальну рідину збільшується її температура. В процесі обробки нафтопродуктів при температурі вище 90 °С починається процес газифікації, тобто можуть виділятися розчинені гази, такі як метан, етан, пропан та інші легкі вуглеводні. З метою контролю температури рідини необхідно встановити термометр (ТР). Через підвищення температури рідини та подачі водню до закритої камери установки, де обробляється нафтопродукт буде відбуватись підвищення тиску, саме тому необхідно передбачити запобіжний клапан (КТ) та манометр (МН) для



а **б**

Рис. 4. *а* – Епюра звукового тиску у циліндричній камері при збуджені радіальної моди коливань; *б* – Візуалізація кавітаційної області у центральній частині камери, що спостерігається через торцеве скло [21]

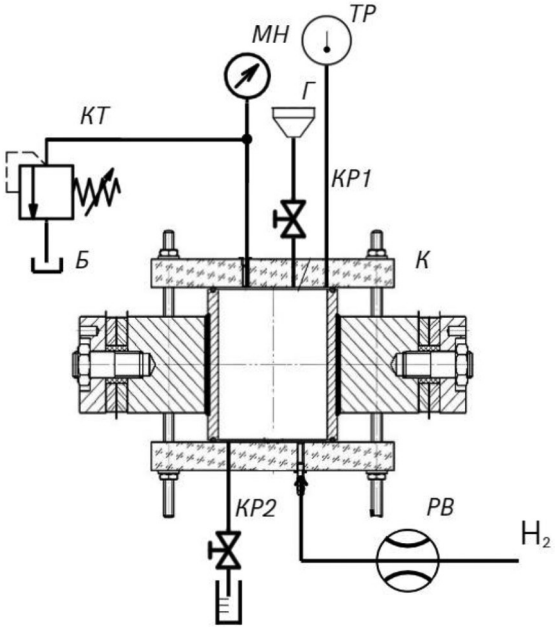


Рис. 5. Схема установки для кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів

контролю тиску. Для створення даної установки попередньо було розроблено гідравлічну схему, яка представлена на рисунку 5.

Спираючись на запропоновано схему були виготовлені елементи установки, які давали можливість встановити необхідне вимірювальне обладнання на ультразвукову кавітаційну камеру та місця для підводу та зливу робочої рідини. Отвір для подачі водневого газу розміщено в нижній частині установки з метою спрощення заповнення всього об'єму робочої камери. Конструкція установки забезпечує легкий доступ до робочої камери, що дозволяє проводити очистку її внутрішніх поверхонь від залишків нафтопродуктів. Розроблений демонстраційний стенд представлено на рисунку 6.

Для перевірки працездатності розробленої нами установки необхідно визначити кількість легких вуглеводнів в обробленій рідині. Для цього, необхідно розділити її на фракції методом перегону.

Перегоном нафти називають процес її термічного розділення на частини (фракції) без помітного розкладання вуглеводнів, що входять до складу нафти. Даний процес оснований на властивості вуглеводнів, які входять до складу нафти, виділення пари певної пружності за певних значень температури. При збільшені температури нафти, що переганяється, відбувається підвищення пружності пари над нею, в момент коли вона досягає значення тиску, який дорівнює або перевищує тиск навколишнього середовища, відбувається рух частинок пари у простір із меншим тиском. Пара, яка виходить із нагрівального апарата, охолоджується, відбувається процес конденсації, створюючи розрідження. Це дозволяє більш висококиплячим частинам суміші, що переганяється відділитись.

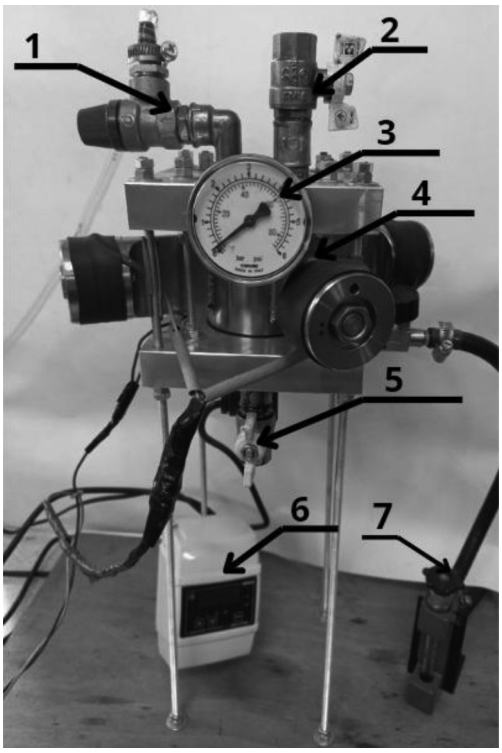


Рис. 6. Установка для кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів (1 – клапан тиску, 2 – заливна горловина, 3 – манометр, 4 – кавітаційна камера, 5 – зливний кран, 6 – датчик температури, 7 – регулятор витрати)

Тобто відбувається безупинний процес переміщення пари із простору, який нагрівається, до охолоджуваного середовища, який продовжується до повного перегону рідини. Зазвичай нафту переганяють на наступні фракції: бензинову, що википає до 170–200 °С; гасову, що википає від 175 до 270 °С; газойлеву – 270–350 °С і кубовий залишок-мазут. У лабораторній практиці застосовують перегонку нафти з поступовим випарюванням в для одержання точного розділення великої кількості фракцій [7].

Проведений аналіз літератури по створенню перегонних установок в лабораторних умовах (рис. 7) [22] дозволив визначитись з параметрами і характеристиками необхідного обладнання, на основі якого було виготовлено установку представлену на рисунку 8.

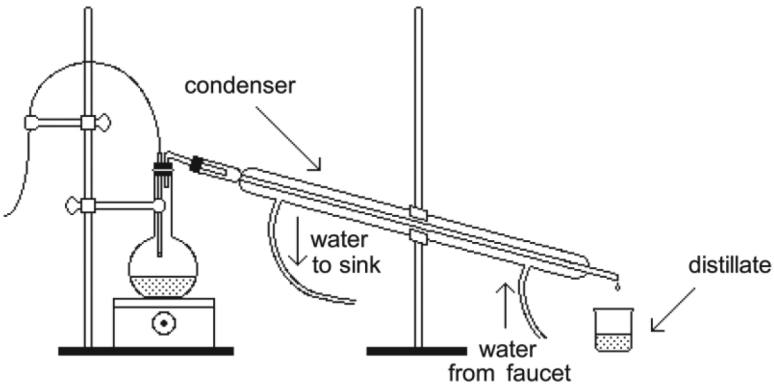


Рис. 7. Схема пристрою для фракційної перегонки рідких речовин [22]

Дана установка оснащена колбонагрівачем LTHS 2000, який дозволяє виконати плавний нагрів рідини до 400 °С, що повністю відповідає необхідному значенню температури для розділення нафтопродуктів на фракції. Для роботи з обробленою рідиною використовуємо перегінну колбу об’ємом 100 мл, термометром з межею вимірювання до 400 °С та кульковим, проточним холодильником.

Підготовлене нами обладнання буде використано для проведення майбутніх досліджень з кавітаційного гідрування будь яких типів важких нафтопродуктів. В подальших дослідженнях ми плануємо розширити спектр

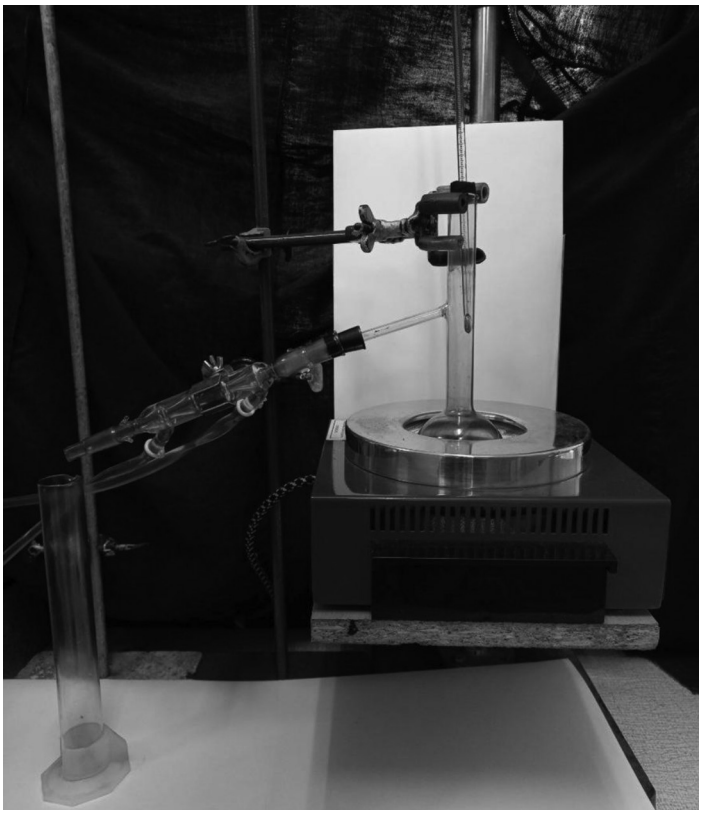


Рис. 8. Пристрій для фракційної перегонки рідких речовин

досліджуваних параметрів, таких як визначення оптимальної кількості водню для різних типів нафтопродуктів, варіації тиску та температури, а також оптимізувати ультразвукові характеристики для максимального підвищення продуктивності установки. Особливу увагу буде приділено дослідженню можливостей зниження енерговитрат і підвищенню виходу світлих фракцій, що є важливими економічними показниками.

Висновки

Проведено аналіз відомих методів переробки важких нафтопродуктів, а саме каталітичного розщеплення, термохімічного методу, зневоднення з подальшим захороненням сухих залишків та визначено їх недоліки.

Розглянуто принцип роботи установки для ультразвукового крекінгу вуглеводневих сполук, на основі чого було створено установку для кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів на базі ультразвукового трубчастого кавітатора. Він дозволяє здійснити концентрацію ультразвукової енергії у центральній частині циліндричної камери та має більшу область обробки робочої рідини, що дозволяє досягти більш ефективного розщеплення молекул вуглеводнів.

Реалізована установка для фракційної перегонки рідких речовин з метою визначення кількості світлих фракцій після проведення обробки важких нафтопродуктів. Дана установка дозволяє здійснювати розділення компонентів нафтопродуктів на різні фракції, такі як бензин, гас, дизель та інші. Використання перегонного пристрою дає можливість оперативно здійснювати перевірку та обробку результатів кавітаційного гідрування. Це забезпечує можливість швидкого внесення коректив до параметрів кавітаційної установки, що сприяє вдосконаленню методів переробки.

Список використаної літератури

1. Suas, F., Safri, A., & Benmouna, A. (2021). Review on rheology of heavy crude oil for pipeline transportation. Oil Research, 6, 116–136. https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.001

2. Rana, M.S., Sámano, V., Ancheyta, J., & Diaz, J.A.I. (2007). Review of recent technological advances for upgrading heavy oils and residues. Fuel, 86, 1216–1231. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.01.013

3. Топільницький, П.І., Романчук, В.В., Ярмола, Т.В., Зінченко, Д.В. (2020). Фізико-хімічні властивості важких нафт Яблунівського родовища з високим вмістом сірки. Вісник НУ «Львівська політехніка»: Хімія, технологія речовин та їх застосування, 3, 75–82. https://doi.org/10.23939/ctas2020.01.075

4. Prasad, S.K., Kakati, A., & Sangwai, J.S. (2020). Rheology of heavy crude oil and asphaltene-polymer composite blends. In S. Thomas, C. Sarathchandran, & N. Chandran (Eds.), Rheology of polymer blends and nanocomposites (pp. 161–192). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816957-5.00008-2

5. Meyer, R. F., & Attanasi, E. D. (2003). Heavy oil and natural bitumen – Strategic petroleum resources. USGS Fact Sheet, 3. https://doi.org/10.3133/fs0700

6. Santos, R. G., Loh, W., Bannwart, A. C., & Trevisan, O. V. (2014). An overview of heavy oil properties and its recovery and transportation methods. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 31, 571–590. https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140313s00001853

7. Саранчук, В. І., Іляшов, М. О., Ошовський, В. В., & Білецький, В. С. (2008). Хімія і фізика горючих копалин. Донецьк : Східний видавничий дім.

8. Sun, J., Yu, H., Yin, Z., Jiang, L., Wang, L., Hu, S., & Zhou, R. (2023). Simulation and optimization process of rich gas compression and absorption stabilization of the fluid catalytic cracking unit. Processes, 11(7), 2140. https://doi.org/10.3390/pr11072140

9. Білецький, В. С., Бойко, В. С., & Букін, С. Л. (2007). Мала гірнича енциклопедія, т. 2. Донецьк : Донбас.

10. Dufour, J., Serrano, D. P., Gálvez, J. L., Moreno, J., & García, C. (2011). Syngas from hydrocarbon liquids via supercritical water gasification. Applied Catalysis B: Environmental, 108–109, 40–49. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.07.036

11. Durak, H. (2023). Comprehensive assessment of thermochemical processes for sustainable waste management and resource recovery. Processes, 11(7), 2092. https://doi.org/10.3390/pr11072092

12. Склабінський, В. І., Ляпощенко, О. О., & Артюхов, А. Є. (2011). Технологічні основи переробки нафти і газу. Суми : Сумський державний університет.

13. Wang, J., Huang, J., Cao, J., & Fu, L. (2019). Challenges and advances in the dewatering of oil sludge: A review. Fuel, 252, 813–825. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.118

14. Zeng, G., Zhang, Y., Huang, G., Yu, M., & Fang, W. (2007). Treatment and recycling of oily sludge. Journal of Hazardous Materials, 151(2–3), 254–261. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.020

15. Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2003). The study of the oxidation process of coal and biomass blends using TG and FTIR. Fuel, 82(15–17), 1955–1961. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00147-6

16. Шевчук, В. Я., Чеботко, К. О., & Розгуляєв, В. М. (2001). Біотехнологія отримання органо-мінеральних добрив із вторинної сировини. Київ : ІСД МО.

17. Liu, J., Wu, Y., Chen, S., & Li, L. (2014). Techno-economic analysis of oil sludge treatment by pyrolysis and dewatering. Energy Conversion and Management, 88, 944–951. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.003

18. Petroleum refining. (2024). Encyclopaedia Britannica. Retrieved from https://www.britannica.com/technology/petroleum-refining (accessed June 5, 2024).

19. Войтович, О. В. (2014). Ультразвукова установка для гідрокрекінгу вуглеводнів (UA92137U). Retrieved from https://patents.google.com/patent/UA92137U/en

20. Гришко, І. А., Новосад, А. А., & Луговський, О. Ф. (2014). Дослідження робочої зони проточного трубчастого кавітатора з високою інтенсивністю ультразвукових коливань. Промислова гідравліка і пневматика, 2, 9–15.

21. Луговський, О., Зілінський, А., Шульга, А., Лавриненков, А., Гришко, І., & Берник, І. (2020). Експериментальне дослідження стійкості конструкційних матеріалів до кавітаційної ерозії. Механіка та передові технології, 3(90), 29–33.

22. Randall, J., Espinoza, R. L. S., Lewandowski, S. L., Freeman, D., Ragsdale, R., & Thomas, N. (2017). Organic chemistry with Vernier. Beaverton, OR: Vernier Software & Technology. Retrieved from https://www.vernier.com/product/organic-chemistry-with-vernier

References

1. Suas, F., Safri, A., & Benmouna, A. (2021). Review on rheology of heavy crude oil for pipeline transportation. Oil Research, 6, 116–136. https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.001

2. Rana, M. S., Sámano, V., Ancheyta, J., & Diaz, J. A. I. (2007). Review of recent technological advances for upgrading heavy oils and residues. Fuel, 86, 1216–1231. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.01.013

3. Topilnytskyy, P. I., Romanchuk, V. V., Yarmola, T. V., & Zinchenko, D. V. (2020). Fizyko-khimichni vlastyvosti vazhkykh naft Yablunivskoho rodovyshcha z vysokym vmistom sirky [Physico-chemical properties of heavy oils of the Yabluniv field with high sulfur content]. Visnyk NU "Lvivska Politekhnika": Khimiya, Tekhnolohiya Rechovyn ta Yikh Zastosuvannya, 3, 75–82. https://doi.org/10.23939/ctas2020.01.075 (in Ukrainian)

4. Prasad, S. K., Kakati, A., & Sangwai, J. S. (2020). Rheology of heavy crude oil and asphaltene-polymer composite blends. In S. Thomas, C. Sarathchandran, & N. Chandran (Eds.), Rheology of polymer blends and nanocomposites (pp. 161–192). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816957-5.00008-2

5. Meyer, R. F., & Attanasi, E. D. (2003). Heavy oil and natural bitumen – Strategic petroleum resources. USGS Fact Sheet, 3. https://doi.org/10.3133/fs0700

6. Santos, R. G., Loh, W., Bannwart, A. C., & Trevisan, O. V. (2014). An overview of heavy oil properties and its recovery and transportation methods. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 31, 571–590. https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140313s00001853

7. Saranchuk, V. I., Ilyashov, M. O., Oshovskyi, V. V., & Biletskyi, V. S. (2008). Khimia i fizyka horiuchykh kopalyn [Chemistry and physics of fossil fuels]. Donetsk: Skhidnyi Vydavnychyi Dim. (in Ukrainian)

8. Sun, J., Yu, H., Yin, Z., Jiang, L., Wang, L., Hu, S., & Zhou, R. (2023). Simulation and optimization process of rich gas compression and absorption stabilization of the fluid catalytic cracking unit. Processes, 11(7), 2140. https://doi.org/10.3390/pr11072140

9. Biletskyi, V. S., Boiko, V. S., & Bukin, S. L. (2007). Mala hirnycha entsyklopediia, t. 2 [Small mining encyclopedia, Vol. 2]. Donetsk: Donbas. (in Ukrainian)

10. Dufour, J., Serrano, D. P., Gálvez, J. L., Moreno, J., & García, C. (2011). Syngas from hydrocarbon liquids via supercritical water gasification. Applied Catalysis B: Environmental, 108–109, 40–49. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.07.036

11. Durak, H. (2023). Comprehensive assessment of thermochemical processes for sustainable waste management and resource recovery. Processes, 11(7), 2092. https://doi.org/10.3390/pr11072092

12. Sklabinskyi, V. I., Lyaposhchenko, O. O., & Artyukhov, A. E. (2011). Tekhnolohichni osnovy pererobky nafty i hazu [Technological fundamentals of oil and gas processing]. Sumy: Sumskyi Derzhavnyi Universytet. (in Ukrainian)

13. Wang, J., Huang, J., Cao, J., & Fu, L. (2019). Challenges and advances in the dewatering of oil sludge: A review. Fuel, 252, 813–825. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.118

14. Zeng, G., Zhang, Y., Huang, G., Yu, M., & Fang, W. (2007). Treatment and recycling of oily sludge. Journal of Hazardous Materials, 151(2–3), 254–261. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.020

15. Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2003). The study of the oxidation process of coal and biomass blends using TG and FTIR. Fuel, 82(15–17), 1955–1961. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00147-6

16. Shevchuk, V. Ya., Chebotko, K. O., & Rozguliaiev, V. M. (2001). Biotekhnolohiia otrymannia orhano-mineralnykh dobryv iz vtorynnoi syrovyny [Biotechnology of obtaining organomineral fertilizers from secondary raw materials]. Kyiv: ISD MO. (in Ukrainian)

17. Liu, J., Wu, Y., Chen, S., & Li, L. (2014). Techno-economic analysis of oil sludge treatment by pyrolysis and dewatering. Energy Conversion and Management, 88, 944–951. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.003

18. Petroleum refining. (2024). Encyclopaedia Britannica. Retrieved from https://www.britannica.com/technology/petroleum-refining (accessed June 5, 2024).

19. Voitovich, O. V. (2014). Ultrazvukova ustanovka dlia hidrokrakinhvu vuhevodeniv [Ultrasonic hydrocarbon cracking unit] (UA92137U). Retrieved from https://patents.google.com/patent/UA92137U/en (in Ukrainian)

20. Hryshko, I. A., Novosad, A. A., & Luhovskyi, O. F. (2014). Doslidzhennia robochoi zony protochnoho trubchastoho kavitatora z vysokoiu intensyvnistiu ultrazvukovykh kolyvan [Study of the working area of a flow tubular cavitator with high-intensity ultrasonic vibrations]. Promyslova Hidravlika i Pnevmatyka, 2, 9–15. (in Ukrainian)

21. Luhovskyi, O., Zilinskyi, A., Shulha, A., Lavrynenkov, A., Hryshko, I., & Bernyk, I. (2020). Experimental study of structural materials resistance to cavitation erosion. Mechanics and Advanced Technologies, 3(90), 29–33. (in Ukrainian)

22. Randall, J., Espinoza, R. L. S., Lewandowski, S. L., Freeman, D., Ragsdale, R., & Thomas, N. (2017). Organic chemistry with Vernier. Beaverton, Oregon: Vernier Software & Technology. Retrieved from https://www.vernier.com/product/organic-chemistry-with-vernier