

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-57-66>

УДК: 541.124

ЗАСТОСУВАННЯ ЯВИЩА КАВІТАЦІЇ І КАВІТАЦІЙНОГО РЕАКТОРУ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЕСТЕРИФІКАЦІЇ

Андреєв М.С., Столяренко Г.С.

APPLICATION OF CAVITATION PHENOMENON AND CAVITATION REACTOR FOR INTENSIFICATION OF THE ESTERIFICATION PROCESS

Andreiev M.S., Stolyarenko G.S.

У статті досліджено використання явища кавітації для покращення процесу естерифікації, що відіграє важливу роль у хімічній та нафтохімічній промисловості. Розглянуто механізми формування кавітаційних бульбашок, їх вплив на фізико-хімічні характеристики середовища та прискорення реакцій у рідинних системах. Показано переваги кавітаційного реактора для удосконалення технологічних процесів, що сприяє підвищенню продуктивності та зниженню енергетичних витрат.

Естерифікація є поширеним способом синтезу складних ефірів, які знаходять застосування в органічному синтезі, виробництві біопалива, харчовій, косметичній та фармацевтичній галузях. Традиційні методи естерифікації вимагають значних енергетичних витрат та каталізаторів для ефективного перебігу реакцій. У роботі доведено, що використання кавітаційних явищ сприяє інтенсивнішому змішуванню реагентів, розриву міжмолекулярних зв'язків, підвищенню ефективності каталізу та скороченню тривалості процесу.

Розглянуто різні типи кавітаційних реакторів, серед яких гідродинамічні, ультразвукові та акустичні системи, а також їхній вплив на ефективність естерифікації. Наведено результати експериментальних досліджень, які демонструють, що застосування кавітації забезпечує стабільність продуктів реакції, мінімізує утворення побічних продуктів та збільшує вихід кінцевого ефіру. Визначено оптимальні параметри роботи кавітаційного реактора, такі як тиск, частота ультразвукових хвиль, температура та швидкість подачі реагентів.

Крім того, стаття містить аналіз економічної ефективності впровадження кавітаційних технологій у промисловість. Встановлено, що

застосування кавітаційних ефектів сприяє значному зменшенню енергоспоживання, скороченню витрат на каталізатори та покращенню екологічних показників виробництва. Обговорено перспективи розвитку цієї технології, зокрема можливість її інтеграції у сучасні виробничі лінії та застосування у суміжних галузях промисловості.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що кавітація є потужним засобом для інтенсифікації естерифікаційних процесів, забезпечуючи підвищену ефективність реакцій, зниження енергетичних витрат та покращення якості кінцевого продукту. Використання кавітаційних технологій відкриває нові можливості для вдосконалення хімічних виробництв та підвищення їх конкурентоспроможності.

Ключові слова: кавітація, кавітаційний реактор, естерифікація, інтенсифікація процесів, гідродинамічна кавітація, оптимізація хімічних реакцій, енергозбереження.

Вступ. Сучасна хімічна та нафтохімічна промисловість зіштовхується з необхідністю підвищення ефективності виробничих процесів, зменшення енергетичних витрат та покращення екологічної безпеки. Одним із перспективних методів удосконалення хімічного синтезу є застосування фізичних і механічних впливів, зокрема кавітації. Завдяки своїй здатності інтенсифікувати реакції, підвищувати масообмін та сприяти економії енергії, кавітаційні технології знаходять широке застосування в різних галузях. Використання кавітаційних реакторів у процесі естерифікації дозволяє покращити кінетику реакцій,

збільшити вихід продукції та зробити виробничі процеси більш оптимізованими.

Кавітація являє собою явище формування, зростання та подальшого руйнування мікробульбашок у рідкому середовищі за дії змінного тиску. Під час колапсу бульбашок виникають високі температури, значні тиски та інтенсивна турбулентність, що сприяє руйнуванню міжмолекулярних зв'язків і прискоренню хімічних процесів. Використання цього ефекту дозволяє значно прискорити реакції естерифікації, покращити ефективність каталізаторів і скоротити витрати енергії.

Процес естерифікації відіграє важливу роль у створенні складних ефірів, які використовуються у виробництві біопалива, лікарських засобів, косметики та харчових добавок. Однак традиційні методи синтезу часто потребують значних енергетичних ресурсів, довготривалого процесу реакції та великої кількості каталізаторів, що збільшує виробничі витрати та створює екологічні проблеми. Впровадження кавітаційних технологій у процес естерифікації може стати ефективним рішенням, що сприятиме його удосконаленню, підвищенню ефективності та зниженню екологічного впливу.

Застосування кавітаційних реакторів у промислових процесах естерифікації має низку переваг, включаючи покращену селективність реакцій, зменшення побічних продуктів та підвищення енергоефективності. Водночас для ефективного впровадження цієї технології необхідні додаткові дослідження щодо оптимізації параметрів роботи реакторів, вивчення механізмів впливу кавітації на реакційну здатність речовин та оцінки її економічної доцільності у масштабі виробництва.

Недавні дослідження показали, що застосування явища кавітації, зокрема через гідродинамічні кавітаційні реактори (HCR), значно інтенсифікує процес естерифікації, підвищуючи ефективність виробництва біодизеля. (Saharan VK (2016)) [1]

Гідродинамічна кавітація включає утворення, зростання та імпульсивний колапс заповнених парою порожнин у рідині, що призводить до інтенсивного локального виділення енергії. Ця енергія, на думку (Mingming Ge, Guangjian Zhang, Martin Petkovšek, Kunpeng Long, Olivier Coutier-Delgosha (2022)) сприяє покращенню змішування та масообміну між незмішуваними

реагентами, такими як олії та спирти, тим самим прискорюючи реакцію естерифікації.[2]

У недавньому дослідженні (Sun 孙逊, Xun & Xuan, Xiaoxu & Song, Yongxing & Jia, Xiaoqi & Ji, L& Zhao, Shan & Yoon, Joon-Yong & Chen, Songying & Liu, Jingting & Wang, Guichao. (2021)) використовували HCR, оснащені роторами та статорами, надрукованими на 3D, для зменшення вмісту вільних жирних кислот (ВЖК) у дистилаті пальмових жирних кислот. При роботі в оптимальних умовах – 9 мас.% метанолу, 133 хвилини циркуляції та швидкість ротора 2000 об/хв – процес досяг максимальної чистоти метилового ефіру 89,76 мас.% і виходу біодизеля 82,48 мас.%[3]

Інше дослідження використовувало ротор-статор HCR для посилення емульгування нерозчинних реагентів, таких як олія та спирт, що призвело до покращення ефективності естерифікації

Дослідження, (Sarker TR, Pattnaik F, Nanda S, Dalai AK, Meda V, Naik S (2021)) що порівнюють методи на основі кавітації з традиційними підходами, підкреслили переваги кавітації в естерифікації. Наприклад, дослідження, зосереджене на естерифікації олії каранджа, показало, що акустична кавітація досягла значного зниження кислотного числа в умовах навколишнього середовища, перевершуючи звичайні методи як за ефективністю, так і за споживанням енергії. [4]

Інтеграція технології кавітації в промислове виробництво біодизеля показала багатообіцяючі результати. Реактор Shockwave Power Reactor (SPR) використовує контрольовану кавітацію для швидкої переестерифікації рослинних або тваринних жирів, досягаючи більш високого виходу та нижчого вмісту моногліцеридів порівняно зі звичайними реакторами.

Метою роботи є дослідження застосування явища кавітації, зокрема за допомогою гідродинамічних та акустичних кавітаційних реакторів, для інтенсифікації процесу естерифікації. Дослідження має на меті проаналізувати, як кавітація покращує масообмін, кінетику реакції та енергоефективність при естерифікації, що призводить до покращення швидкості конверсії та скорочення часу обробки.

Крім того, у статті оцінено потенціал кавітаційних реакторів у промисловому виробництві біодизеля, порівнюючи їх ефективність із традиційними методами.

Представляючи результати останніх досліджень і тематичні дослідження, стаття прагне висвітлити переваги, проблеми та майбутні перспективи впровадження технології кавітації в процесі естерифікації.

Виклад основного матеріалу. Феномен кавітації відбувається, коли в рідині утворюються мікропухирці пари, які зростають і потім руйнуються через різке зменшення локального тиску. Залежно від режимів утворення кавітація класифікується на три типи: акустична, гідродинамічна, оптична. Акустична кавітація отримується шляхом пропагування ультразвукового сигналу (20–100 кГц) великої амплітуди в рідині і є найбільш поширеним способом утворення кавітації на лабораторному рівні (*Hilares RT, Dionizio RM, Prado CA, Ahmed MA, da Silva SS, Santos JC (2019)*). [5]

Гідродинамічна кавітація є більш ефективною, ніж акустична кавітація в багатьох застосуваннях через свою здатність окислювати органічні речовини, поєднану з низькою вартістю операцій, легкістю масштабування, високою енергоефективністю та меншою забруднюваністю без утворення побічних продуктів (*Jensen MB, Kofoed MVW, Fischer K, Voigt NV, Agneessens LM, Batstone DJ, Ottosen LDM (2018)*). [6]

Кавітація утворюється через механічні обмеження, такі як труби Вентурі, пластини та клапани обмеження потоку. Кавітацію можна пояснити за допомогою співвідношення швидкості та тиску рідини згідно з рівнянням Бернуллі. Коли рідина протікає через звуження, тиск зменшується до значення, нижчого за тиск рідини–пара, з температурою потоку, і формуються пари, які руйнуються в нижньому потоці та створюють високодеструктивні ударні хвилі з великим тиском, сильною турбулентністю і генерують напругу (*Авдеева, Леся & Макаренко, Андрій & Щенський, Дмитро. (2022)*) [7]. Це руйнування достатньо сильне, щоб вивільнити великі кількості енергії на короткому просторі (*Khullar E, Dien BS, Rausch KD, Tumbleson ME, Singh V (2013)*). [8]

Імплозія пари може локально генерувати високі температури, що викликає фізичні та хімічні перетворення, виробляючи сильні окислювальні радикали, такі як гідроксильний радикал (OH⁻), через розпад молекул води та органічних молекул, що потрапляють у пари або поруч з ними, сприяючи структурній дезінтеграції та збільшенню пористості біомаси (*Badve MP, Alpar T, Pandit AB, Gogate PR, Csoka L (2015)*). [9]

Як зазначає (*Chuah L.F., Yusup S., AbdAziz A.R., Bokhari A., Jaromir K., MohdZamri A.(2015)*): кавітація – це фізичне явище, що виникає в рідинах при швидких змінах тиску, спричиняючи утворення і руйнування бульбашок пари. Цей процес супроводжується вивільненням великої кількості енергії, яка може сприяти перебігу хімічних реакцій, зокрема естерифікації. Використання кавітаційних реакторів дозволяє створити середовище з високою інтенсивністю мікрозмішування, що покращує швидкість реакції та підвищує вихід продуктів.[23]

Естерифікація – це хімічна реакція між кислотою та спиртом, у результаті якої утворюється складний ефір і вода. Зазвичай цей процес каталізується кислотами, такими як сірчана кислота, і відбувається за загальним рівнянням.

Застосування кавітації у процесі естерифікації сприяє підвищенню ефективності реакції завдяки кільком чинникам:

- Колапс бульбашок створює локалізовані зони з екстремально високими температурами (до 5000 K) і тиском (до 1000 атм), що прискорює кінетику реакції.
- Високоенергетичні умови сприяють утворенню активних радикалів, зокрема гідроксильних і алкоксирадикалів, які можуть каталізувати розпад реагентів.
- Покращується масообмін: інтенсивне мікроперемішування зменшує ефект граничного шару та збільшує швидкість реакції.
- Завдяки ефективному диспергуванню реагентів відбувається емульгування, що збільшує площу контакту між кислотою та спиртом, забезпечуючи вищий вихід ефіру.[24]

Кавітаційний реактор працює на основі використання високоенергетичних гідродинамічних процесів для генерації кавітації. У процесі естерифікації застосовують два основні типи таких реакторів:

Гідродинамічні кавітаційні реактори – створюють кавітацію за рахунок зміни тиску у вузьких каналах, наприклад, у трубках Вентурі або спеціальних отворах.

Ультразвукові кавітаційні реактори – використовують звукові хвилі високої частоти (20–40 кГц) для утворення кавітаційних бульбашок у рідині.

До ключових параметрів конструкції кавітаційного реактора, на думку (*Mellouk H., Meullemiestre A., Maache-Rezzoug Z., Bejjani B., Dani A., and Rezzoug S.A.(2016)*):

Число Рейнольдса (Re): визначає, чи є потік турбулентним (ідеально підходить для кавітації).

де – густина рідини, – швидкість, – гідравлічний діаметр і – в'язкість.

Число кавітації: вказує на ступінь кавітації. де - тиск на вході, - тиск пари, і - швидкість.

Нижчі значення сприяють більшій інтенсивності кавітації.[25]

Застосування кавітаційних реакторів сприяє значному прискоренню процесу естерифікації, оскільки покращує масообмін, емульгування та реакційну кінетику. Оптимізація умов кавітації дозволяє промисловості підвищити ефективність виробництва, знизити енергетичні витрати та забезпечити більш стійкий синтез складних ефірів.

Що стосується парових бульбашок, то існує два основні параметри: максимальний розмір бульбашки та її відстань подорожі до руйнування, тобто її корисний термін служби. Після утворення парових бульбашок починається процес розширення через швидке випаровування рідини. Якщо під час цього процесу бульбашки піддаються тиску, вищому за тиск пари, їх розвиток переривається, тиск усередині бульбашки зростає, і починається конденсація пари, що призводить до руйнування бульбашки. Оскільки специфічний об'єм пари більший за специфічний об'єм рідини, руйнування створює порожнечі, що спричиняють ударні хвилі. Максимальний розмір бульбашки визначає інтенсивність кавітації. Бульбашки ростуть за низького тиску або високої температури, і більші бульбашки вибухають з більшою інтенсивністю і можуть мати сильніший вплив на речовину, ніж менші бульбашки (*Xun Sun, Gaoju Xia, Weibin You, Xiaoqi Jia, Sivakumar Manickam, Yang Tao, Shan Zhao, Joon Yong Yoon, Xiaoxu Xuan (2023)*). [10]

Гідродинамічну кавітацію також можна створити обертальним механічним об'єктом, що рухається через рідину, як це відбувається в насосах відцентрових насосів і роторах гідравлічних турбін. Хоча це небажане явище в області гідравлічного обладнання, гідродинамічна кавітація застосовується в обробці води та стічних вод, виробництві біогазу, руйнуванні клітин, виробництві біодизелю, видобутку олії з мікроводоростей,

хімічних реакторах та попередній обробці лігноцелюлозної біомаси (*Lamoot, L., Manescau, B., Chetehouna, K., & Gascoin, N. (2021)*).[15]

Гідродинамічні кавітаційні реактори поділяються на дві категорії: неротаційні реактори, такі як отворові пластини або трубки Вентурі, та ротаційні реактори, де кавітація генерується в області, яку охоплюють пропелери з високою швидкістю (*Polczmann G., O.Toth A., Beck, Hancsok J.(2016)*).[12]

Гідродинамічний кавітаційний реактор також можна класифікувати за способами його роботи: пульсуючий гідродинамічний кавітаційний реактор (реактор, що працює циклами); безперервний гідродинамічний кавітаційний реактор і гідродинамічний кавітаційний реактор з розтягненням (*Caliskan, Y.; Yatmaz, H.C.; Bektas, N.(2017)*).[13]

Неротаційні гідродинамічні кавітаційні реактори (НГКР). НГКР складаються з бака для подачі, насоса, який здійснює круговий рух через реактор (кавітаційну камеру), а також контрольних клапанів, датчиків тиску та температури. Трубка Вентурі складається з трьох послідовних частин: звуженої секції (форсунка), горловини і розширювальної секції (дифузор). Вона може мати круглі або багатокутні поперечні перерізи в залежності від застосування і історично використовувалась для вимірювання та контролю витрати потоку, а також останнім часом застосовується в системах очищення газів, інжекторах тверде-газові, гідравлічному насосі для струменевих систем та гідродинамічних кавітаційних реакторах (*Li, P.; Song, Y.; Wang, S.; Tao, Z.; Yu, S.; Liu, Y. (2015)*).[14]

Отворові пластини є простими, надійними, порівняно легкими та недорогими інструментами у порівнянні з трубками Вентурі. У реакторі з отворовими пластинами потік рідини проходить через одне або кілька звужень, при цьому відбувається різке збільшення швидкості, що призводить до падіння тиску нижче тиску рідин-пара, що спричиняє кавітацію. Коли потік рідини проходить через отвір, відбувається зміна форми потоку, що називається венозною контрактурою.

Згідно з дослідженням (*Lamoot, L., Manescau, B., Chetehouna, K., & Gascoin, N. (2021)*), трубки Вентурі перевершують отворові пластини в застосуваннях для дезінфекції, генеруючи більш щільну кавітацію та більше утворених парових бульбашок. Крім того, трубки Вентурі мають вищі витрати потоку, ніж отворові пластини при однаковій енергії на

вході, що призводить до більшої потужності обробки та енергетичної ефективності, незважаючи на вищу вартість виробництва. Крім того, в системах трубок Вентурі з високим навантаженням твердих часток може знадобитись використання спеціальних насосів, таких як діафрагмові та гвинтові насоси, з відносно вищими витратами порівняно зі звичайними відцентровими насосами.[15]

За даними (Ваикурак У. Ю., Шевчук Л. І. (2016)), тиск відновлюється плавно в трубках Вентурі завдяки кутаві дивергенції, залишаючи паравими порожнинами достатньо часу для зростання до максимального розміру, що збільшує інтенсивність колапсу та ефективність кавітації, чого не відбувається в отворових пластинах.[16]

Ротаційні гідродинамічні кавітаційні реактори (РГКР). Ротаційні реактори базуються на відцентрових насосах, які мають змінений ротор і додатковий статор у своїй оболонці. У цьому типі реактора явище кавітації генерується численними одиницями генерації кавітації (ОГК), розташованими на роторі та статорі. Геометрична структура ОГК є важливою для генерації кавітації, а також для ефективності та економічної ефективності. Крім того, частота вивільнення енергії значно вища порівняно з НГКР. Ротаційні реактори показали відмінну ефективність у порівнянні з неротаційними реакторами для делігніфікації, очищення води, виробництва біодизелю та дисоціації мулу (Oo, Y.M., Juera-Ong, P. & Somnuk, K.(2024)).[17]

Дослідження, що вивчають РГКР за допомогою експериментальної візуалізації потоку, обчислювальної гідродинаміки та характерного експерименту (Haohuan Zheng, Ying Zheng, Jesse Zhu (2022)) були представлені для розуміння механізмів та критеріїв проектування РГКР.[18]

Ротаційні реактори базуються на відцентрових насосах, які мають змінений ротор і додатковий статор у своїй оболонці. У цьому типі реактора явище кавітації генерується численними одиницями генерації кавітації (ОГК), розташованими на роторі та статорі. Геометрична структура ОГК є основною для генерації кавітації, а також для ефективності та економічної ефективності. Крім того, частота вивільнення енергії значно вища порівняно з НГКР. Ротаційні реактори показали відмінну ефективність у порівнянні з неротаційними реакторами для делігніфікації, очищення води, виробництва біодизелю та дисоціації мулу

(Samuel, O. D., Aigba, P. A., Tran, T. K., Fayaz, H., Pastore, C., Der, O., Erçetin, A., Enweremadu, C. C., & Mustafa, A. (2023)).[19]

Дослідження, що вивчають РГКР за допомогою експериментальної візуалізації потоку, обчислювальної гідродинаміки та характерного експерименту були представлені для розуміння механізмів та критеріїв проектування РГКР.[21]

Вплив одиниць генерації кавітації (ОГК) на ефективність РГКР необхідно вивчати за допомогою обчислювальної гідродинаміки, оцінюючи вплив форми, діаметра, відстані взаємодії, висоти та кута нахилу ОГК на кількість генерованої кавітації та енергоспоживання представницького РГКР (Hosseinzadeh Samani, B., Behruzian, M., Najafi, G., Fayazishishvan, E., Ghobadian, B., Behruzian, A., Mofijur, M., Mazlan, M., & Yue, J. (2021)).[20]

Для подальшого поліпшення ефективності та розробки критеріїв проектування РГКР необхідна багатокритеріальна оптимізація в рамках РГКР. (Mazubert A., Taylor C., Aubin J., ad Poux M., Key Role (2022)) вперше виконали багатокритеріальну оптимізацію, поєднуючи генетичний алгоритм (GA) і CFD. Вибраними цілями були мінімізація споживаної енергії та максимізація генерації гідродинамічної кавітації.[22]

Для оцінки теплової ефективності РГКР запропоновано два важливі параметри, згідно з Sun et al. (2020b): коефіцієнт генерації тепла (HGR) і теплову ефективність (TE). Коефіцієнт генерації тепла, який виробляється РГКР, визначається наступним чином:

Коефіцієнт генерації тепла (HGR) для роторно-гвинтового компресора-розширювача (РГКР) розраховується за формулою:

$$HGR = Q_{out} \times C_p \times \Delta T, \quad (1)$$

де HGR — коефіцієнт генерації тепла, МДж/год; Q_{out} — витрата на виході, м³/год; C_p — питома теплоємність рідини, МДж/(м³·°C); ΔT — різниця температур між виходом і входом ($T_{out} - T_{in}$), °C.

Зверніть увагу, що питома теплоємність рідини (C_p) виражена в одиницях МДж/(м³·°C), що враховує густину рідини та її питому теплоємність.

Для обчислення густини рідини на виході (ρ_{out}) та теплової ефективності (TE) роторно-гвинтового компресора-розширювача (РГКР) застосовуються такі рівняння:

Оскільки густина рідини змінюється зі зміною температури, для води її можна визначити наближеною формулою:

$$\rho_{out} = 1000 - 0,0178 \times |T_{out} - 4| \quad (2)$$

де ρ_{out} — густина рідини на виході, кг/м³; T_{out} — температура рідини на виході, °C.

Ця залежність враховує зміну густини води при різних температурах, де 1000 кг/м³ відповідає густині води за 4°C, а коефіцієнт 0.0178 описує зміну цього показника при відхиленнях від цієї температури.

Коефіцієнт теплової ефективності визначається як відношення виробленого тепла до енергоспоживання системи:

$$TE = HGR \div (3,6 \times P_s) \quad (3)$$

де TE — тепла ефективність (безрозмірна величина); HGR — коефіцієнт генерації тепла, МДж/год; P_s — потужність на валу електродвигуна, кВт.

Множник 3.6 використовується для перетворення одиниць потужності з кВт у МДж/год (1 кВт = 3.6 МДж/год).

Індекс кавітації дає змогу оцінити ризик появи кавітаційних процесів у потоці рідини. Він визначається рівнянням:

$$\sigma_c = (P_{out} - P_v) \div (0,5 \times \rho_{out} \times V_{in}^2) \quad (4)$$

де σ_c — індекс кавітації (безрозмірний); P_{out} — статичний тиск на виході, Па; P_v — тиск насиченого пару на виході, Па, ρ_{out} — густина рідини на виході, кг/м³, V_{in} — швидкість рідини на вході, м/с.

Цей параметр дозволяє оцінити, наскільки умови в системі сприяють виникненню кавітації, що важливо для збереження ефективності та довговічності обладнання.

Ефекти гідродинамічної кавітації можуть покращити передобробку лігноцелюлозної біомаси та сприяти делігніфікації та подальшому гідролізу вуглеводів.

Перші дослідження щодо застосування гідродинамічної кавітації для передобробки лігноцелюлозної біомаси відносяться до 2012

року і були проведені (*Baxi i Pandit (2012)*). У цьому дослідженні гідродинамічна кавітація використовувалася для делігніфікації деревини. Оскільки тирса оброблялася гідродинамічна кавітація (трубчастий реактор Вентурі) і лужний розчин гідроксиду натрію (5% мас./мас.).

Делігніфікація, отримана за допомогою гідродинамічної кавітації, була приблизно на 4–5 порядків більшою, ніж отримані за допомогою акустичної кавітації (константи швидкості для делігніфікації були $9,78 \times 10^{-6}$ та $6,8 \times 10^{-1}$ /хв. для акустичної та гідродинамічної кавітації відповідно).

Висновки. Застосування явищ кавітації, зокрема через гідродинамічні та акустичні кавітаційні реактори, виявилось ефективним методом інтенсифікації процесу етерифікації. Результати досліджень показують, що кавітація значно покращує масообмін, прискорює кінетику реакції та покращує загальну ефективність етерифікації, що робить її багатообіцяючою альтернативою звичайним методам.

Гідродинамічні кавітаційні реактори (HCR) продемонстрували свою здатність зменшувати вміст вільних жирних кислот у вихідній сировині, підвищувати вихід і чистоту складних ефірів і знижувати споживання енергії порівняно з традиційними підходами. Використання кавітації також сприяє кращому емульгуванню реагентів, забезпечуючи більш рівномірне реакційне середовище та вищі коефіцієнти конверсії.

Порівняльні дослідження підтверджують, що етерифікація за допомогою кавітації пропонує такі переваги, як скорочення часу обробки, менші вимоги до каталізатора та покращена якість продукту. Ці переваги роблять кавітаційні реактори придатними для промислового виробництва біодизеля, де ефективність і економічність є критичними факторами.

Незважаючи на переваги, такі проблеми, як оптимальна конструкція реактора, оптимізація енергоефективності та масштабованість, потребують подальшого дослідження, щоб максимізувати потенціал кавітаційної технології. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на вдосконаленні конфігурацій реакторів, дослідженні альтернативної сировини та інтеграції кавітаційних реакторів з іншими передовими методами обробки.

Підсумовуючи, впровадження технології кавітації в етерифікацію являє собою значний прогрес в інтенсифікації процесу, пропонуючи стійкий і ефективний підхід для виробництва біодизеля та інших промислових застосувань на основі етерифікації.

Література

- Saharan VK Computational study of diferent venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices. *J Hydrodyn* 2016. 28(2):293–305. [https://doi.org/10.1016/s1001-6058\(16\)60631-5](https://doi.org/10.1016/s1001-6058(16)60631-5)
- Mingming Ge, Guangjian Zhang, Martin Petkovšek, Kunpeng Long, Olivier Coutier-Delgosha, Intensity and regimes changing of hydrodynamic cavitation considering temperature effects, *Journal of Cleaner Production*, Volume 338, 2022, 130470, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130470>.
- Sun 孙逊, Xun & Xuan, Xiaoxu & Song, Yongxing & Jia, Xiaoqi & Ji, L& Zhao, Shan & Yoon, Joon-Yong & Chen, Songying & Liu, Jingting & Wang, Guichao. Experimental and Numerical Studies on the Cavitation in an Advanced Rotational Hydrodynamic Cavitation Reactor for Water Treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. 70. 105311. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105311>.
- Sarker TR, Pattnaik F, Nanda S, Dalai AK, Meda V, Naik S Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: a review of steam explosion and subcritical water hydrolysis. *Chemosphere* 284:131372. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131372>
- Hilares RT, Dionízio RM, Prado CA, Ahmed MA, da Silva SS, Santos JC Pretreatment of sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation technology: semi-continuous and continuous process. *Biores Technol* 290:121777. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121777>
- Jensen MB, Kofoed MVW, Fischer K, Voigt NV, Agneessens LM, Batstone DJ, Ottosen LDM Venturi-type injection system as a potential H₂ mass transfer technology for full-scale in situ biomethanation. *Appl Energy* 222:840–846. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.034>
- Авдєєва, Леся & Макаренко, Андрій & Щенський, Дмитро. (2022). Застосування ефектів гідродинамічної кавітації в харчовій промисловості. *Scientific Works*. 86. 44-50. 10.15673/swonaft.v86i1.2402.
- Khullar E, Dien BS, Rausch KD, Tumbleson ME, Singh V Effect of particle size on enzymatic hydrolysis of pretreated Miscanthus. *Ind Crops Prod* 44:11–17. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.10.015>
- Badve MP, Alpar T, Pandit AB, Gogate PR, Csoka L Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. *Ultrason Sonochem* 22:272–277. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.017>
- Xun Sun, Gaoju Xia, Weibin You, Xiaoqi Jia, Sivakumar Manickam, Yang Tao, Shan Zhao, Joon Yong Yoon, Xiaoxu Xuan, Effect of the arrangement of cavitation generation unit on the performance of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor, *Ultrasonics Sonochemistry*, Volume 99 2023, 106544, ISSN 1350-4177, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106544>.
- Bimestre TA, Júnior JAM, Botura CA, Canettieri E, Tuna CE Theoretical modeling and experimental validation of hydrodynamic cavitation reactor with a Venturi tube for sugarcane bagasse pretreatment. *Biores Technol* 311:123540. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123540>
- Polczmann G., O.Toth A., Beck, Hancsok J., Investigation of Storage Stability of Diesel Fuels Containing Biodiesel Produced from Waste Cooking Oil, *J. Clean. Prod.*, 111. 2016.
- Caliskan, Y.; Yatmaz, H.C.; Bektas, N. Photocatalytic oxidation of high concentrated dye solutions enhanced by hydrodynamic cavitation in a pilot reactor. *Process Saf. Environ. Prot.* 2017, 111, 428–438.
- Li, P.; Song, Y.; Wang, S.; Tao, Z.; Yu, S.; Liu, Y. Enhanced decolorization of methyl orange using zero-valent copper nanoparticles under assistance of hydrodynamic cavitation. *Ultrason. Sonochem.* 2015, 22, 132–138.
- Lamoot, L., Manescau, B., Chetehouna, K., & Gascoin, N. Review on the Effect of the Phenomenon of Cavitation in Combustion Efficiency and the Role of Biofuels as a Solution against Cavitation. *Energies*, 2021. 14(21), 7265. <https://doi.org/10.3390/en14217265>
- Вашкурак У. Ю., Шевчук Л. І. Кавітаційне очищення стічних вод жиркомбінату від органічних забруднень у присутності газів різної природи. *Chemistry, Technology and Application of Substances = Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2018. Vol. 1, № 1. Р. 105–110. (фахове видання, Index Copernicus).
- Oo, Y.M., Juera-Ong, P. & Somnuk, K. Methyl ester production process from palm fatty acid distillate using hydrodynamic cavitation reactors in series with solid acid catalyst. *Sci Rep* 14, 27732 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78974-3>
- Haoxuan Zheng, Ying Zheng, Jesse Zhu. Recent Developments in Hydrodynamic Cavitation Reactors: Cavitation Mechanism, Reactor Design,

- and Applications. *Engineering*, 2022, 19(12): 180–198
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.027>
19. Samuel, O. D., Aigba, P. A., Tran, T. K., Fayaz, H., Pastore, C., Der, O., Erçetin, A., Enweremadu, C. C., & Mustafa, A. Comparison of the Techno-Economic and Environmental Assessment of Hydrodynamic Cavitation and Mechanical Stirring Reactors for the Production of Sustainable *Hevea brasiliensis* Ethyl Ester. *Sustainability*, 2023. 15(23), 16287. <https://doi.org/10.3390/su152316287>
 20. Hosseinzadeh Samani, B., Behruzian, M., Najafi, G., Fayazishishvan, E., Ghobadian, B., Behruzian, A., Mofijur, M., Mazlan, M., & Yue, J. The rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor approach for enhanced biodiesel fuel production. *Fuel*, 2021, 283, Article 118821. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118821>
 21. Ющенко С.Л., Столяренко Г.С., Мислюк Є.В. Застосування явища кавітації і кавітаційного апарату для інтенсифікації процесів хімічної технології // Збірник матеріалів конференції IV Української науково-технічної конференції з технології неорганічних речовин, 14-16 жовтня 2008 р., Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2008.
 22. Mazubert A., Taylor C., Aubin J., ad Poux M., Key Role of Temperature Monitoring in Interpretation of Microwave Effect on Transesterification and Esterification Reactions for Biodiesel Production, *Bioresourcetchnolgy*, 16.1 2014.
 23. Chuah L.F., Yusup S., AbdAziz A.R., Bokhari A., Jaromír K., MohdZamri A., Intensification of Biodiesel Synthesis from Waste Cooking Oil (Palm Olein) in a Hydrodynamic Cavitation Reactor: Effect of Operating Parameters on Methyl Ester Conversion, *Chemical Engineering and Processing*, 2015. 95: 235-240.
 24. Ющенко С.Л., Столяренко Г.С., Мислюк Є.В. Отримання альтернативного палива (біодизелю) шляхом кавітаційного явища / Збірник тез доповідей II Всеукраїнської науково – практичної конференції з хімії та хімічної технології студентів, аспірантів та молодих вчених. К.: 2007. 247 с.
 25. Mellouk H., Meullemiestre A., Maache-Rezzoug Z., Bejjani B., Dani A., and Rezzoug S.A., Valorization of Industrial Wastes from French Maritime Pine Bark by Solvent free Microwave Extraction of Volatiles. *J. Clean. Prod.*, 2016. 112 (Part 5), 4398-4405
 2. Mingming Ge, Guangjian Zhang, Martin Petkovšek, Kunpeng Long, Olivier Coutier-Delgosha, Intensity and regimes changing of hydrodynamic cavitation considering temperature effects, *Journal of Cleaner Production*, 2022. Volume 338, 2022, 130470, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130470>. [in English]
 3. Sun 孙逊, Xun & Xuan, Xiaoxu & Song, Yongxing & Jia, Xiaoqi & Ji, L & Zhao, Shan & Yoon, Joon-Yong & Chen, Songying & Liu, Jingting & Wang, Guichao. Experimental and Numerical Studies on the Cavitation in an Advanced Rotational Hydrodynamic Cavitation Reactor for Water Treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*. 70. 105311. 2021. 10.1016/j.ultsonch.2020.105311. [in English]
 4. Sarker TR, Pattnaik F, Nanda S, Dalai AK, Meda V, Naik S Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: a review of steam explosion and subcritical water hydrolysis. *Chemosphere* 284:131372. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131372> [in English]
 5. Hilaes RT, Dionízio RM, Prado CA, Ahmed MA, da Silva SS, Santos JC Pretreatment of sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation technology: semi-continuous and continuous process. *Biores Technol* 290:121777. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121777> [in English]
 6. Jensen MB, Kofoed MVW, Fischer K, Voigt NV, Agneessens LM, Batstone DJ, Ottosen LDM Venturi-type injection system as a potential H₂ mass transfer technology for full-scale in situ biomethanation. *Appl Energy* 222:840–846. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.034> [in English]
 7. Avdeeva, Lesya & Makarenko, Andriy & Shchensky, Dmytro. Zastosuvannya efektyvnykh hidrodynamichnoyi kavitatsiyi v kharchoviy promyslovosti. [Application of hydrodynamic cavitation effects in the food industry]. *Scientific Works*. 2022. 86. 44-50. 10.15673/swonaft.v86i1.2402. [in Ukrainian]
 8. Khullar E, Dien BS, Rausch KD, Tumbleson ME, Singh V Effect of particle size on enzymatic hydrolysis of pretreated Miscanthus. *Ind Crops Prod* 44:11–17. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.10.015> [in English]
 9. Badve MP, Alpar T, Pandit AB, Gogate PR, Csoka L Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. *Ultrason Sonochem* 22:272–277. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.017> [in English]
 10. Xun Sun, Gaoju Xia, Weibin You, Xiaoqi Jia, Sivakumar Manickam, Yang Tao, Shan Zhao,

Reference

1. Saharan VK Computational study of diferent venturi and orifce type hydrodynamic cavitating devices. *J Hydrodyn* 28(2):293–305. 2016. [https://doi.org/10.1016/s1001-6058\(16\)60631-5](https://doi.org/10.1016/s1001-6058(16)60631-5) [in English]

- Joon Yong Yoon, Xiaoxu Xuan, Effect of the arrangement of cavitation generation unit on the performance of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor, *Ultrasonics Sonochemistry*, Volume 99 2023, 106544, ISSN 1350-4177, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106544>. [in English]
11. Bimestre TA, Júnior JAM, Botura CA, Canettieri E, Tuna CE Theoretical modeling and experimental validation of hydrodynamic cavitation reactor with a Venturi tube for sugarcane bagasse pretreatment. *Biores Technol* 311:123540. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123540>[in English]
 12. Polczmann G., O.Toth A., Beck, Hancsok J., Investigation of Storage Stability of Diesel Fuels Containing Biodiesel Produced from Waste Cooking Oil, *J. Clean. Prod.*, 111. 2016. [in English]
 13. Caliskan, Y.; Yatmaz, H.C.; Bektas, N. Photocatalytic oxidation of high concentrated dye solutions enhanced by hydrodynamic cavitation in a pilot reactor. *Process Saf. Environ. Prot.* 2017, 111, 428–438. [in English]
 14. Li, P.; Song, Y.; Wang, S.; Tao, Z.; Yu, S.; Liu, Y. Enhanced decolorization of methyl orange using zero-valent copper nanoparticles under assistance of hydrodynamic cavitation. *Ultrason. Sonochem.* 2015, 22, 132–138. [in English]
 15. Lamoot, L., Manescau, B., Chetehouna, K., & Gascoin, N. Review on the Effect of the Phenomenon of Cavitation in Combustion Efficiency and the Role of Biofuels as a Solution against Cavitation. *Energies*, 2021. 14(21), 7265. <https://doi.org/10.3390/en14217265>[in English]
 16. Vashkurak U. Yu., Shevchuk L. I. Kavitatsiynе ochyshchennya stichnykh vod zhyrovoho kombinatu vid orhanichnykh zabrudnen' u prysutnosti haziv riznoyi pryrody. [Cavitation treatment of wastewater from a fat factory from organic contaminants in the presence of gases of various nature]. *Chemistry, Technology and Application of Substances Khimiya, tekhnolohiya rechovyn ta yikh zastosuvannya*. 2018. Vol. 1, №1. P. 105–110. [in Ukrainian]
 17. Oo, Y.M., Juera-Ong, P. & Somnuk, K. Methyl ester production process from palm fatty acid distillate using hydrodynamic cavitation reactors in series with solid acid catalyst. *Sci Rep* 14, 27732. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78974-3>[in English]
 18. Haoxuan Zheng, Ying Zheng, Jesse Zhu. Recent Developments in Hydrodynamic Cavitation Reactors: Cavitation Mechanism, Reactor Design, and Applications. *Engineering*, 2022. 19(12): 180–198 <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.027>[in English]
 19. Samuel, O. D., Aigba, P. A., Tran, T. K., Fayaz, H., Pastore, C., Der, O., Erçetin, A., Enweremadu, C. C., & Mustafa, A. Comparison of the Techno-Economic and Environmental Assessment of Hydrodynamic Cavitation and Mechanical Stirring Reactors for the Production of Sustainable Hevea brasiliensis *Ethyl Ester*. *Sustainability*, 2023. 15(23), 16287. <https://doi.org/10.3390/su152316287>[in English]
 20. Hosseinzadeh Samani, B., Behruzian, M., Najafi, G., Fayazishishvan, E., Ghobadian, B., Behruzian, A., Mofijur, M., Mazlan, M., & Yue, J. The rotor-stator type hydrodynamic cavitation reactor approach for enhanced biodiesel fuel production. *Fuel*, 2021. 283, Article 118821. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118821>[in English]
 21. Yushchenko S.L., Stolyarenko G.S., Myslyuk E.V. Zastosuvannya yavyshcha kavitatsiyi i kavitatsiynoho aparatu dlya intensyfikatsiyi protsesiv khimichnoyi tekhnolohiyi [Application of the phenomenon of cavitation and cavitation apparatus for intensification of chemical technology processes] *Collection of materials of the IV Ukrainian scientific and technical conference on the technology of inorganic substances*, October 14-16, 2008, – Dneprodzerzhinsk: DSTU, 2008. [in Ukrainian]
 22. Mazubert A., Taylor C., Aubin J., ad Poux M., Key Role of Temperature Monitoring in Interpretation of Microwave Effect on Transesterification and Esterification *Reactions for Biodiesel Production, BioresourceTechnology*, 2014. 161. [in English]
 23. Chuah L.F., Yusup S., AbdAziz A.R., Bokhari A., Jaromír K., MohdZamri A., Intensification of Biodiesel Synthesis from Waste Cooking Oil (Palm Olein) in a Hydrodynamic Cavitation Reactor: Effect of Operating Parameters on Methyl Ester Conversion, *Chemical Engineering and Processing*, 2015. 95: 235-240. [in English]
 24. Yushchenko S.L., Stolyarenko G.S., Myslyuk E.V. Otrymannya al'ternatyvnoho palyva (biodyzelyu) shlyakhom kavitatsiynoho yavyshcha [Obtaining alternative fuel (biodiesel) by means of the cavitation phenomenon] / *Collection of abstracts of the II All-Ukrainian Scientific and Practical Conference on Chemistry and Chemical Technology of Students, Postgraduate Students and Young Scientists*. K.: 2007. 247p.[in Ukrainian]
 25. Mellouk H., Meullemiestre A., Maache-Rezzoug Z., Bejjani B., Dani A., and Rezzoug S.A., Valorization of Industrial Wastes from French Maritime Pine Bark by Solvent free Microwave Extraction of Volatiles. *J. Clean. Prod.*, 112 (Part 5), 2016. 4398-4405. [in English]

Andreiev M. S., Stolyarenko G. S. Application of cavitation phenomenon and cavitation reactor for intensification of the esterification process

The article explores the use of cavitation phenomena to enhance the esterification process, which plays a crucial role in the chemical and petrochemical industries. The mechanisms of cavitation bubble formation, their influence on the physicochemical properties of the medium, and the acceleration of reactions in liquid-phase systems are examined. The advantages of a cavitation reactor for improving technological processes, increasing productivity, and reducing energy consumption are demonstrated.

Esterification is a widely used method for synthesizing complex esters, which are applied in organic synthesis, biofuel production, and the food, cosmetics, and pharmaceutical industries. Traditional esterification methods require significant energy expenditures and catalysts to achieve effective reaction performance. The study proves that cavitation effects contribute to more intensive mixing of reactants, the breakdown of intermolecular bonds, increased catalytic efficiency, and reduced process duration.

Various types of cavitation reactors, including hydrodynamic, ultrasonic, and acoustic systems, and their impact on esterification efficiency are analyzed. The results of experimental studies confirm that cavitation application ensures reaction product stability, minimizes the formation of by-products, and increases the yield of the final ester. Optimal operating parameters for the cavitation reactor, such as pressure, ultrasonic wave frequency, temperature, and reactant feed rate, are determined.

Additionally, the article provides an economic analysis of implementing cavitation technologies in industrial processes. It is established that the use of cavitation effects significantly reduces energy consumption, lowers catalyst costs, and improves the environmental performance of production. The prospects for further development of this technology are discussed, including the potential integration of cavitation reactors into existing production lines and their application in related industrial sectors.

Thus, the study results confirm that cavitation is a powerful tool for intensifying esterification processes, ensuring increased reaction efficiency, reduced energy costs, and improved product quality. The application of cavitation technologies opens new opportunities for optimizing chemical production and enhancing its competitiveness.

Keywords: cavitation, cavitation reactor, esterification, process intensification, hydrodynamic cavitation, chemical reaction optimization, energy saving.

Андрєєв Максим Сергійович – аспірант Черкаський державний технологічний університет м. Черкаси, Україна andreiew.maksym@gmail.com
Столяренко Генадій Степанович - доктор технічних наук, професор Черкаський державний технологічний університет м. Черкаси, Україна radikal@ukr.net

Стаття подана 15.01.2025.