

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-31>

УДК 62.64

ХОДЕЄВ АНДРІЙ

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0009-0000-8391-9853>

a.a.khodiev@khai.edu

ЗАБОЛОТНИЙ ОЛЕКСАНДР

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0001-8266-4481>

o.zabolotnyi@khai.edu

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ПРЕЦИЗІЙНОГО ДОЗУВАННЯ ТА МЕМБРАННОЇ ОБРОБКИ ВОДНО-ПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ

В роботі розглянуто принцип виготовлення стабільних водно-паливних емульсій використовуючи три основні технологічні етапи: термоструменеве дозування, мембранну емульсифікацію та автоматизований контроль однорідності емульсії за показниками датчиків каламутності. Традиційні методи виготовлення емульсій забезпечують подрібнення крапель дисперсної фази в діапазоні від 1 до 10 мкм., причому розмір крапель безпосередньо впливає на ефективність згоряння водно-паливних емульсій і зниження викидів в атмосферу. В сучасних технологіях виготовлення водно-паливних емульсій використовують класичні методи дозування дисперсної фази, через що значну кількість енергії витрачають на первинне перемішування емульсії перед початком процесу подрібнення крапель. Запропонована система передбачає по крапельне дозування води в паливо, використовуючи термоструменеві дозатори. На першому етапі дозування формують грубу емульсію. Подальшу обробку грубої емульсії здійснюють шляхом багаторазового проходження емульсії крізь мембранний модуль до моменту отримання необхідної гомогенності з очікуваним розміром крапель дисперсної фази. В системі реалізовано багаторівневий моніторинг за процесом виготовлення емульсії на кожному етапі і контроль стабільності за допомогою датчиків каламутності. Датчики каламутності типу TSW-30 були експериментально протестовані на зразках водно-дизельної емульсії із вмістом води 10%, 15% і 20%. За значеннями каламутності можливо відстежувати втрату стабільності емульсії, початок коалесценції та повне розшарування. Наведено структурну схему інтегрованої автоматизованої установки виготовлення водно-паливних емульсій, де рішення про дозування, кількість циклів рециркуляції крізь мембрану та завершення процесу приймається за результатами вимірювання каламутності.

Ключові слова: Водно-паливна емульсія, термоструменеве дозування, мембранне емульгування, каламутність, гомогенізація

KHODIEIEV ANDRII, OLEKSANDR ZABOLOTNYI

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»

AUTOMATED SYSTEM FOR DOSING AND MEMBRANE TREATMENT OF WATER-FUEL EMULSIONS WITH TURBIDITY CONTROL

The paper considers the principle of manufacturing stable water-fuel emulsions using three main technological stages: thermal jet dosing, membrane emulsification, and automated control of emulsion homogeneity based on turbidity sensor readings. Traditional methods of emulsion production ensure the grinding of dispersed phase droplets in the range from 1 to 10 microns, with the size of the droplets directly affecting the combustion efficiency of water-fuel emulsions and the reduction of emissions into the atmosphere. Modern technologies for the production of water-fuel emulsions use classical methods of disperse phase dosing, which means that a significant amount of energy is spent on the initial mixing of the emulsion before the start of the droplet grinding process. The proposed system provides for drop-by-drop dosing of water into fuel using thermal jet dispensers. At the first stage of dosing, a coarse emulsion is formed. Further processing of the coarse emulsion is carried out by repeatedly passing the emulsion through a membrane module until the required homogeneity with the expected droplet size of the dispersed phase is achieved. The system implements multi-level monitoring of the emulsion production process at each stage and stability control using turbidity sensors. TSW-30 turbidity sensors were experimentally tested on samples of water-diesel emulsion with water content of 10%, 15% and 20%. Turbidity values can be used to track emulsion stability loss, the onset of coalescence and complete separation. A structural diagram of an integrated automated plant for the production of water-fuel emulsions is presented, where decisions on dosing, the number of recirculation cycles through the membrane and the completion of the process are made based on the results of turbidity measurements.

Keywords: Water-fuel emulsion, thermal jet dosing, membrane emulsification, turbidity, homogenization

Стаття надійшла до редакції / Received 28.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 16.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Ходєєв Андрій, Заболотний Олександр

Проблематика та її зв'язок із науковими чи практичними завданнями

Підвищення ефективності згоряння дизельного палива та зниження викидів оксидів азоту, сажі і чорного диму є актуальним завданням сучасної енергетики, транспорту та промислової інфраструктури. Традиційні палива широко використовуються в технологічних процесах в усіх технічних сферах і вже давно довели свою ефективність. Одним із перспективних методів використання традиційних палив є створення водно-паливних емульсій (ВПЕ), під час спалювання яких відбувається зменшення витрати палива та покращення екологічних показників [1-4]. Ключовою задачею залишається отримання стабільних у часі ВПЕ з точним відсотковим вмістом води і відтворюваним розміром крапель дисперсної фази [5].

Наявні технології дозування і змішування не забезпечують високої точності уведення водної складової,

а емульсії, створені традиційними методами виготовлення, мають широкий діапазон розміру крапель дисперсної фази. Додатковою задачею стоїть контроль стабільності емульсії під час виготовлення і зберігання в режимі реального часу з автоматичним моніторингом. Створення системи, яка поєднує високоточне дозування, кероване емульгування та моніторинг якості емульсії в процесі виготовлення є актуальним завданням для підвищення надійності та енергоефективності процесу виготовлення ВПЕ.

Сучасний стан досліджень

Для виготовлення ВПЕ застосовують різноманітні методи, такі як механічні міксери, гомогенізація ультразвуком, мембранне емульгування тощо. При використанні механічних, ультразвукових установок та їх комбінацій досягають значних результатів: розмір часток дисперсної фази знаходиться в діапазоні від 1 до 10 мкм, але має суттєву варіабельність [6-9]. З іншого боку, мембранне емульгування дає контрольований розмір крапель дисперсної фази, причому розмір крапель може бути обчислений і залежить від матеріалу мембрани та діаметру її пор. Під час мембранного емульгування очікуваний розмір крапель дисперсної фази зазвичай перевищує розмір пори мембрани у два рази [10]. При застосуванні традиційних методів виготовлення ВПЕ не приділяють особливої уваги способу дозування дисперсної фази в паливо. Її вводять насосом до ємності, в якій здійснюють подальше перемішування, що не є ефективним. Адже дисперсна частка уводиться однією порцією, що призводить до майже миттєвої коалесценції з подальшим осадженням на дні ємності. В процесі подальшого приготування ВПЕ значну кількість часу та енергії витрачають на первинне перемішування для подальше подрібнення крапель.

У сучасних дослідженнях практично відсутні рішення щодо автоматизованого контролю якості і стабільності ВПЕ в реальному часі. Для оцінки якості наразі використовують методики зняття проб з подальшою оцінкою розміру крапель під мікроскопом, що не дає змоги об'єктивно оцінити результати, адже пробу відбирають з ємності і передають для подальшого дослідження. За цей час оригінальний стан емульсії може змінитись. Іншим методом оцінювання є використання оптичних датчиків вимірювання каламутності, чутливих до концентрації та розміру крапель. Цей метод вважають перспективним, але таким що потребує подальших досліджень.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розроблення інтегрованої системи приготування ВПЕ, яка поєднує високоточне термострумеве дозування дисперсної фази, мембранну обробку грубої емульсії та моніторинг стану емульсії на всіх етапах її виготовлення за допомогою датчиків каламутності.

Виклад основного матеріалу

Для високоточного дозування пропонується використати термострумеві дозатори, за допомогою яких можливо здійснити крапельне дозування води безпосередньо у безперервну фазу. Термострумевий дозатор складається з ємності, в яку вводиться рідина, матриці, в якій розташовані канали з рідиною, де на стінках кожного з каналів вмонтовано терморезистивні нагрівачі [11-14]. Під час подавання на резистивний нагрівач електричного імпульсу тривалістю від 3 до 6 мкс, рідина в камері дозатора розігрівається до температури 300-340 °С. За такої температури в камері розпочинається випаровування рідини, в результаті чого утворюється бульбашка пари. Ця бульбашка розширюється і виштовхує краплю рідини з каналу протягом декількох мікросекунд. Після зникнення напруги на термонагрівачі бульбашка пари зникає і тиск у камері падає, втягуючи наступну порцію рідини (рис.1).



Рис. 1. Принцип формування та викиду краплі

Для успішного формування крапель підбирають оптимальну напругу та тривалість імпульсу залежно від діаметру сопел та характеристик рідини. Підвищення тривалості імпульсів призводить до більш тривалого нагрівання бульбашки, утворюючи більший тиск, що призведе до утворення більшого об'єму рідини на виході з сопла [15-17]. Зменшення тривалості імпульсів призводить до зменшення температури нагрівання, меншого об'єму рідини і меншого розміру крапель на виході з сопел. Збільшення напруги призводить до більш швидкого утворення бульбашки та більш потужного викиду рідини з сопла, що збільшує об'єм та швидкість новоутворених крапель. Керуючі напругою і тривалістю імпульсів можна скорегувати розмір крапель і забезпечити точне дозування об'єму рідини, що вводиться у безперервну фазу. Використання такого дозатора в системі виготовлення ВПЕ підвищує ефективність, а саме забезпечує високу точність дозування дисперсної фази з роздільною здатністю на рівні піколітрів. В процесі дозування одразу отримують грубу емульсію (премікс). Запропонована система має певні переваги у порівнянні з аналогами. На відміну від наявних методів

уведення води в паливо вона дозволяє здійснити енергоефективне дозування води у формі крапель сферичної форми з наперед заданим розміром, і забезпечує гарну повторюваність. Використання дозаторів такого типу забезпечує одночасне дозування, первинне перемішування і утворення грубої емульсії.

Після завершення процесу дозування дисперсної фази та утворення грубої емульсії необхідно здійснити кінцеву гомогенізацію та стабілізацію. Одним з найбільш перспективних технічних рішень для доведення грубих емульсій є мембранне емульгування. Метод мембранного емульгування під час роботи з грубими емульсіями значно відрізняється від прямого мембранного емульгування і має високу ефективність. При прямому емульгуванні дисперсну фазу протискають крізь пори мембрани, на поверхні якої під дією капілярних та гідродинамічних сил формуються краплі певного розміру. Така технологія забезпечує високу однорідність крапель, але має низьку продуктивність і високу вірогідність забивання пор, через що не може використовуватись у промислових масштабах.

Мембранна емульсифікація грубих емульсій працює по іншому. Попередньо отриману грубу емульсію багаторазово прокачують через пористу мембрану, яка виконує роль фізичного селектора розміру крапель (Рис.2). Під дією перепаду тиску ті краплі, розмір яких перевищує діаметр пор мембрани, руйнуються та розпадаються на менші частки. Краплі, діаметр яких є меншим ніж пори мембрани, вільно проходять крізь пори, що призводить до більш точного розподілу крапель за розміром. На відміну від ультразвукового або механічного перемішування, мембрана працює як пасивний елемент, а основну енергія витрачають лише на рециркуляцію рідини [18, 19].

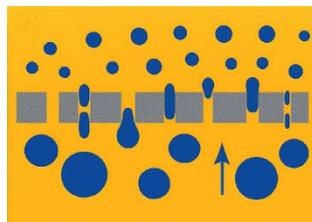


Рис. 2. Процес проходження грубої емульсії крізь пори мембрани

Одним з ключових моментів застосування технології пропускання грубої емульсії крізь мембрану є її рециркуляція до тих пір, поки не буде досягнуто очікуваного стабільного розміру крапель [20, 21]. Наявні результати наукових досліджень підтверджують ефективність використання мембрани для доведення грубих емульсій. Повторне пропускання грубої емульсії через мембрану з діаметром пор 1-1.8 мкм дозволяє зменшити розмір крапель більше ніж у 5 разів. З кожним додатковим пропусканням грубої емульсії через мембрану додатково знижується розмір крапель, який може наблизитись до діаметра пор самої мембрани.

Ефективним інструментом контролю стабільності емульсії в режимі реального часу є оптичні датчики вимірювання каламутності, принцип дії яких базується на вимірюванні світлорозсіювання та оптичної щільності. Результат вимірювання каламутності у нефелометричних одиницях (NTU, Nephelometric Turbidity Units) функціонально залежить від зміни концентрації та розміру крапель дисперсної фази. Зниження показника NTU свідчить про укрупнення або коалесценцію частинок дисперсної фази, тоді як високі та незмінні значення NTU говорять про дрібнодисперсний стабільний стан емульсії. Використання датчиків каламутності у ключових точках технологічного процесу дозволить контролювати якість емульсії та працездатність обладнання на кожному етапі. Перший датчик каламутності доцільно встановлювати в ємності для виготовлення грубої емульсії. Він буде фіксувати зміну каламутності на етапі розповсюдження дисперсної складової у безперервній фазі і відіграватиме роль сигналізатора. Для зниження ризику розшарування емульсії, після закінчення дозування модуль датчика каламутності повинен згенерувати сигнал про готовність до подальшого перекачування емульсії на вхід мембранного модуля або сигналізувати, що груба емульсія вже розшарувалася. Другий датчик встановлюють на виході з мембранного модуля для оцінювання ступеня диспергування та визначення потреби у додаткових циклах рециркуляції. В ємності з готовою емульсією доцільно використовувати декілька датчиків каламутності: зверху, знизу та по центру ємності, для оцінки рівня стабільності емульсії. Залежно від значень NTU на виході трьох датчиків оцінюють рівень розшарування емульсії і приймають рішення про додаткове пропускання емульсії крізь мембрану.

Для вимірювання каламутності водно-паливних емульсій було обрано модуль TSW-30 з контролером TS-300b, діапазон вимірювання якого становить від 0 до 3000 одиниць NTU. Результати попереднього калібрування на стандартних розчинах з використанням каоліну підтвердили лінійність статичної характеристики перетворення датчика на всьому діапазоні вимірювань [22].

Подальші експериментальні дослідження були проведені для трьох зразків дизельного палива (літнього, зимового та арктичного), кожен з яких містив різну кількість води: 10 %, 15 % і 20 %. Водно-дизельні емульсії з різним вмістом вологи було створено з використанням механічного перемішування. На рис. 3 наведено вимірювальну установку: три датчика TSW-30 занурені у три окремі ємності, а відповідні результати вимірювання напруги, пропорційні значенням NTU, фіксувались окремими мультиметрами.

Були отримані експериментальні криві NTU які дають змогу оцінити чутливість датчика на різних рівнях дисперсності. Для зразків із вмістом води 10 %, 15 % та 20 % спостерігається характерне зниження NTU у часі (рис. 4–6), що відповідає процесам укрупнення та осідання крапель.



Рис. 3. Експериментальна установка для вимірювання каламутності у водно-паливних емульсіях

Різниця початкових значень NTU дозволяє ідентифікувати рівень однорідності емульсії. Для гомогенної водно паливної емульсії датчики показують найвищий рівень каламутності, який поступово знижується в процесі розшарування.

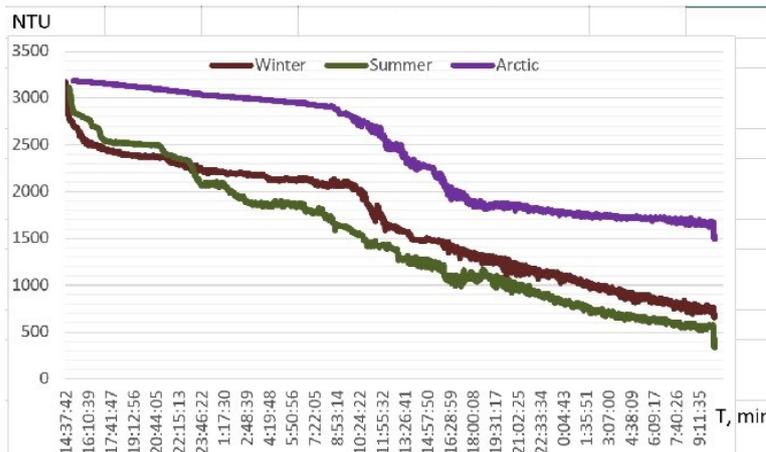


Рис. 4. Зміна каламутності у часі для емульсії з 10 % вмістом води

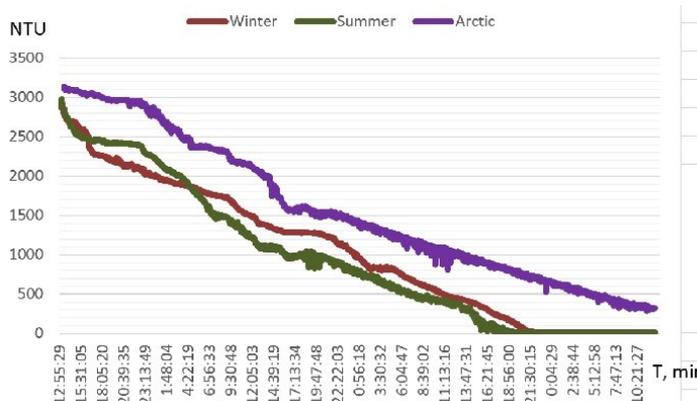


Рис. 5. Зміна каламутності у часі для емульсії з 15 % вмістом води



Рис. 6. Зміна каламутності у часі для емульсії з 20 % вмістом води

Отримані експериментальні залежності значень каламутності для різних концентрацій води в паливі підтверджують, що оптичні датчики каламутності можуть використовуватись як індикатор стабільності водно-паливних емульсій [23]. Високочутливий характер зміни значень NTU дозволяє не лише визначати ступінь диспергування грубої емульсії після термоструменевого дозування, але й первинно оцінювати ефективність проходження грубої водно-паливної емульсії через мембранний модуль.

До складу автоматизованої системи виготовлення водно-паливних емульсій буде доцільно включити процеси уведення рідин до первинних ємностей, керування насосами, дозування та мембранної емульсифікації, які будуть пов'язані між собою. Схему гідравлічну структурну такої системи наведено на рис. 7. Ця схема демонструє взаємозв'язок між елементами дозування, первинного змішування, мембранної обробки та контролю каламутності.

У даній системі кожен елемент відповідає визначеним функціям. Термоструменевий дозатор формує грубу емульсію з високою точністю уведення потрібного об'єму води. В ємності з грубою емульсією датчик каламутності фіксує момент, коли груба емульсія готова для подальшої обробки, або відстежує момент повного осідання води. Мембранний модуль забезпечує подрібнення надлишково великих крапель з подальшим вирівнюванням розміру крапель після багаторазового пропускання. Датчик каламутності на виході мембрани визначає каламутність емульсії після кожного циклу проходження, залежно від значення каламутності приймають рішення про завершення циклу рециркуляції, або проходження додаткового циклу. В ємності з готовою емульсією розміщено декілька датчиків каламутності, що дозволяє контролювати стан емульсії у верхній, нижній і центральній зоні цієї ємності, і, за потреби, для впровадження додаткового циклу рециркуляції через мембранний модуль. Поєднання цих елементів у єдину систему на базі програмованого логічного контролера з чітко прописаним алгоритмом дозволяє реалізувати автоматизований замкнутий цикл обробки. Емульсія може багаторазово проходити через мембранний модуль, поки показники з датчиків не стабілізуються на необхідному рівні. У випадку початку розшарування емульсії система може автоматично запустити цикл повторної рециркуляції.

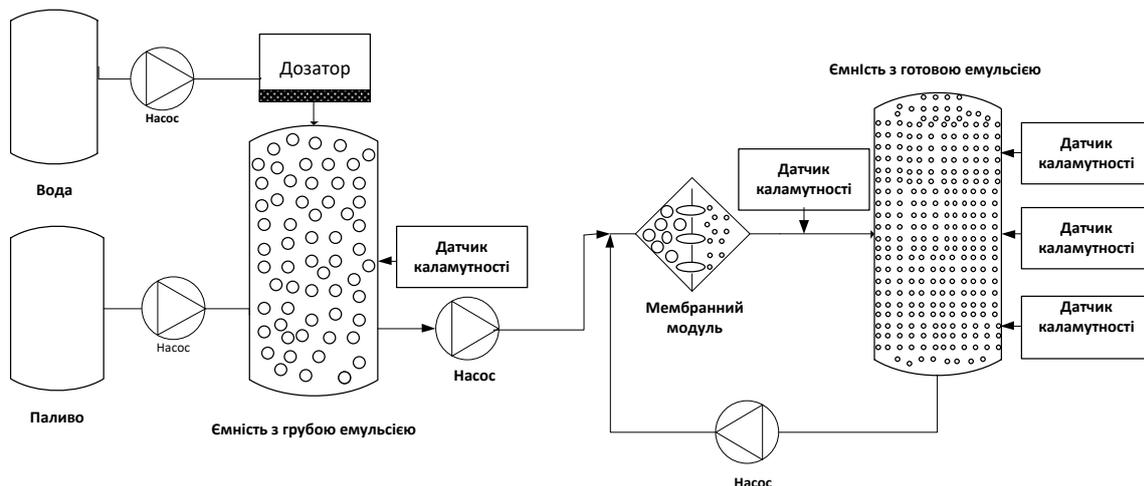


Рис. 7. Схема гідравлічна структурна інтегрованої системи дозування, мембранної обробки та контролю каламутності водно-паливних емульсій

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В роботі описано підхід до створення автоматизованої системи по виготовленню ВПЕ, що поєднує в собі високоточне дозування, мембранну емульсифікацію та автоматизований контроль однорідності і стабільності за допомогою датчиків каламутності. Експериментальні випробування датчиків каламутності типу TSW-30 підтвердили високу чутливість до змін концентрації та дисперсності волиги у дизельних паливах з вмістом волиги 10 %, 15 % і 20 %. Отримані залежності значень каламутності водно-паливних емульсій від часу показали характерні тенденції укрупнення та осідання крапель води. Це дозволяє використовувати датчики каламутності як сигналізатори початку розшарування емульсії.

Запропонована гідравлічна схема ілюструє можливість побудови замкнутого контуру керування процесом гомогенізації емульсій, в якому рішення щодо рециркуляції через мембранний модуль та завершення процесу ухвалюється за результатами вимірювання каламутності. Таке рішення забезпечує підвищену повторюваність, енергоефективність та стабільність отриманої емульсії.

У подальших дослідженнях заплановано провести серію експериментів, спрямованих на встановлення кількісного зв'язку між значеннями каламутності та реальним розміром крапель, визначеним методом мікроскопії. Заплановано пошук функціональної залежності між діаметром крапель дисперсної фази та значенням каламутності, що дозволить використання значень NTU для непрямого визначення розміру крапель водно-паливних емульсій. Це дозволить оптимізувати процес мембранної обробки, визначити необхідну кількість циклів проходження через мембрану та здійснювати контроль стабільності емульсії після тривалого зберігання.

Література

1. Bukkarapu Kiran Raj, Jyothi Y., Raju L. S., Chitti Babu G., Narayanan K. A review on current trends in water in oil emulsions // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 8, No. 4. – P. 359–371. – URL: <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=8&IType=4>
2. Karim Z. A. A., Khan M. Y., Aziz A. R. A., Tan I. M. Characterization of water in diesel emulsion // MATEC Web of Conferences. – 2014. – Vol. 13. – P. 02006. – DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20141302006>.
3. Jeyakumar S., Raja S., Bahadur B. K. R., Yadav S. Study on reduction of NO_x in diesel engine using diesel-water emulsion method // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 2, No. 3. – P. 123–130. – URL: <https://www.irjet.net/archives/V2/i3/IRJET-V2I321.pdf>
4. Karim Z. A. A., Khan M. Y. Experimental investigation of performance and emission characteristics of IDI diesel engine using homogenized water in bio-diesel emulsion // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 225. – P. 04022. – DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822504022>.
5. Patil H., Gadhawe A., Mane S., Waghmare J. Analyzing stability in water-in-diesel fuel emulsion // Journal of Dispersion Science and Technology. – 2015. – Vol. 36, No. 9. – P. 1221–1227. – DOI: <https://doi.org/10.1080/01932691.2014.962039>.
6. Mondal P. K., Mandal B. K. A comparative study on the performance and emissions from a CI engine fuelled with water emulsified diesel prepared by mechanical homogenization and ultrasonic dispersion method // Energy Reports. – 2019. – Vol. 5. – P. 639–648. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.05.006>.
7. Ugbeh-Johnson J., Carpenter M., Okeke N. E., Mai N. Characterization of water droplets size distribution in aviation turbine fuel: ultrasonic homogeniser vs high shear speed mixer // Fuel. – 2023. – Vol. 337. – P. 125674. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125674>.
8. Noge H., Sugiyama K., Koyama M. Performance and emission studies of a common rail turbocharged diesel electric generator fueled with emulsifier-free water/diesel emulsion // Energy. – 2023. – Vol. 268. – P. 120598. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.120598>.
9. Sartomo A., Santoso B., Ubaidillah, Muraza O. Recent progress on mixing technology for water-emulsion fuel: a review // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 213. – P. 112817. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112817>.
10. Sugiura S., Nakajima M., Iwamoto S., Seki M. Preparation of highly monodispersed emulsions by swirl flow membrane emulsification using Shirasu porous glass (SPG) membranes – a comparative study with cross-flow membrane emulsification // Journal of Colloid and Interface Science. – 2004. – Vol. 271, No. 2. – P. 496–499. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.02.038>.
11. Fan Z., Sun Y., Lin J.-M. Self-assembled inkjet printer for droplet digital loop-mediated isothermal amplification // Chemosensors. – 2022. – Vol. 10, No. 7. – P. 247. – DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors10070247>.
12. Uddin M. J., Hassan J., Douroumis D. Thermal inkjet printing: prospects and applications in the development of medicine // Technologies. – 2022. – Vol. 10, No. 5. – P. 108. – DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies10050108>.
13. Maleki H., Bertola V. Recent advances and prospects of inkjet printing in heterogeneous catalysis // Catalysis Science & Technology. – 2020. – Vol. 10, No. 10. – P. 3140–3159. – DOI: <https://doi.org/10.1039/d0cy00040j>.
14. Sohrabi S., Liu Y. Modeling thermal inkjet and cell printing process using modified pseudopotential and thermal lattice Boltzmann methods // Physical Review E. – 2018. – Vol. 97, No. 3. – P. 033105. – DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.033105>.
15. Zhou H., Gué A. M. Simulation model and droplet ejection performance of a thermal-bubble microinjector // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2010. – Vol. 145, No. 1. – P. 311–319. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.12.011>.
16. Liu Y., Derby B. Experimental study of the parameters for stable drop-on-demand inkjet performance // Physics of Fluids. – 2019. – Vol. 31, No. 3. – P. 032004. – DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5085868>.
17. Заболотний, О., & Ходєєв, А. (2025). Термоструменеве дозування як метод утворення водно-паливної емульсії. Automation of Technological and Business Processes, 17(3), 4-12. <https://doi.org/10.15673/atbp.v17i3.3245>
18. Nazir A., Vladisavljević G. T. Droplet breakup mechanisms in premix membrane emulsification and related microfluidic channels. Advances in Colloid and Interface Science. 2021. T. 290. C. 102393. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102393> (дата звернення: 04.06.2025)
19. Joscelyne S. M., Trägårdh G. Membrane emulsification – a literature review. Journal of Membrane Science. 2000. T. 169, № 1. C. 107–117. URL: [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(99\)00334-8](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(99)00334-8) (дата звернення: 04.06.2025).
20. Gehrman S., Bunjes H. Preparation of Nanoemulsions by Premix Membrane Emulsification: Which Parameters Have a Significant Influence on the Resulting Particle Size?. Journal of Pharmaceutical Sciences. 2017. T. 106, № 8. C. 2068–2076. URL: <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2017.04.066> (дата звернення: 04.06.2025)

21. A. Ali, U. T. Syed, T. S. Bak та C. A. Quist-Jensen, “Membrane Emulsification—A Novel Solution for Treatment and Reuse of Produced Water from Oil Field”, *Membranes*, т. 12, № 10, с. 971, жовт. 2022. <https://doi.org/10.3390/membranes12100971>

22. Зabolotnyi, O., Ходєєв, А. Синтез номінальної статичної характеристики перетворення сенсора каламутності TS-300B. *Grail of Science*, (31), 2023. Pp. 187–196. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.15.09.2023.32>

23. Зabolotnyi O. B., Ходєєв А. А. Система контролю гомогенності водно-паливної емульсії // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2023. – № 6. – С. 91–97. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/14>.

References

1. K. R. Raj, Y. Jyothi, L. S. Raju, G. Chitti Babu, and K. Narayanan, “A review on current trends in water in oil emulsions,” *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 359–371, 2017. [Online]. Available: <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=8&IType=4>
2. Z. A. A. Karim, M. Y. Khan, A. R. A. Aziz, and I. M. Tan, “Characterization of water in diesel emulsion,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 13, p. 02006, 2014, doi: 10.1051/mateconf/20141302006.
3. S. Jeyakumar, S. Raja, B. K. R. Bahadur, and S. Yadav, “Study on reduction of NOx in diesel engine using diesel-water emulsion method,” *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 123–130, 2015. [Online]. Available: <https://www.irjet.net/archives/V2/i3/IRJET-V2I321.pdf>
4. Z. A. A. Karim and M. Y. Khan, “Experimental investigation of performance and emission characteristics of IDI diesel engine using homogenized water in bio-diesel emulsion,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 225, p. 04022, 2018, doi: 10.1051/mateconf/201822504022.
5. H. Patil, A. Gadhave, S. Mane, and J. Waghmare, “Analyzing stability in water-in-diesel fuel emulsion,” *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 36, no. 9, pp. 1221–1227, 2015, doi: 10.1080/01932691.2014.962039.
6. P. K. Mondal and B. K. Mandal, “A comparative study on the performance and emissions from a CI engine fuelled with water emulsified diesel prepared by mechanical homogenization and ultrasonic dispersion method,” *Energy Reports*, vol. 5, pp. 639–648, 2019, doi: 10.1016/j.egy.2019.05.006
7. J. Ugbeh-Johnson, M. Carpenter, N. E. Okeke, and N. Mai, “Characterization of water droplets size distribution in aviation turbine fuel: ultrasonic homogeniser vs high shear speed mixer,” *Fuel*, vol. 337, p. 125674, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125674.
8. H. Noge, K. Sugiyama, and M. Koyama, “Performance and emission studies of a common rail turbocharged diesel electric generator fueled with emulsifier-free water/diesel emulsion,” *Energy*, vol. 268, p. 120598, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.120598.
9. A. Sartomo, B. Santoso, Ubaidillah, and O. Muraza, “Recent progress on mixing technology for water-emulsion fuel: a review,” *Energy Conversion and Management*, vol. 213, p. 112817, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112817.
10. S. Sugiura, M. Nakajima, S. Iwamoto, and M. Seki, “Preparation of highly monodispersed emulsions by swirl flow membrane emulsification using Shirasu porous glass (SPG) membranes – a comparative study with cross-flow membrane emulsification,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 271, no. 2, pp. 496–499, 2004, doi: 10.1016/j.jcis.2004.02.038.
11. Z. Fan, Y. Sun, and J.-M. Lin, “Self-assembled inkjet printer for droplet digital loop-mediated isothermal amplification,” *Chemosensors*, vol. 10, no. 7, p. 247, 2022, doi: 10.3390/chemosensors10070247.
12. M. J. Uddin, J. Hassan, and D. Douroumis, “Thermal inkjet printing: prospects and applications in the development of medicine,” *Technologies*, vol. 10, no. 5, p. 108, 2022, doi: 10.3390/technologies10050108.
13. H. Maleki, V. Bertola, “Recent advances and prospects of inkjet printing in heterogeneous catalysis,” *Catalysis Science & Technology*, vol. 10, no. 10, pp. 3140–3159, 2020, doi: 10.1039/d0cy00040j.
14. S. Sohrabi, Y. Liu, “Modeling thermal inkjet and cell printing process using modified pseudopotential and thermal lattice Boltzmann methods,” *Physical Review E*, vol. 97, no. 3, p. 033105, 2018, doi: 10.1103/PhysRevE.97.033105.
15. H. Zhou, A. M. Gué, “Simulation model and droplet ejection performance of a thermal-bubble microjector,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 145, no. 1, pp. 311–319, 2010, doi: 10.1016/j.snb.2009.12.011.
16. Y. Liu, B. Derby, “Experimental study of the parameters for stable drop-on-demand inkjet performance,” *Physics of Fluids*, vol. 31, no. 3, p. 032004, 2019, doi: 10.1063/1.5085868.
17. O. Zabolotnyi and A. Khodieiev, “Thermal inkjet dosing as a method of forming water-fuel emulsion,” *Automation of Technological and Business Processes*, vol. 17, no. 3, pp. 4–12, 2025, doi: 10.15673/atbp.v17i3.3245.
18. Nazir A., Vladisavljević G. T. Droplet breakup mechanisms in premix membrane emulsification and related microfluidic channels. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021. T. 290. C. 102393. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102393>
19. Joscelyne S. M., Trägårdh G. Membrane emulsification – a literature review. *Journal of Membrane Science*. 2000. T. 169, № 1. C. 107–117. URL: [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(99\)00334-8](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(99)00334-8)
20. Gehrman S., Bunjes H. Preparation of Nanoemulsions by Premix Membrane Emulsification: Which Parameters Have a Significant Influence on the Resulting Particle Size?. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2017. T. 106, № 8. C. 2068–2076. URL: <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2017.04.066>
21. A. Ali, U. T. Syed, T. S. Bak та C. A. Quist-Jensen, “Membrane Emulsification—A Novel Solution for Treatment and Reuse of Produced Water from Oil Field”, *Membranes*, т. 12, № 10, с. 971, 2022. <https://doi.org/10.3390/membranes12100971>
22. O. Zabolotnyi, A. Khodieiev, “Synthesis of the nominal static characteristic of the TS-300B turbidity sensor,” *Grail of Science*, no. 31, pp. 187–196, 2023, doi: 10.36074/grail-of-science.15.09.2023.32
23. O. V. Zabolotnyi, A. A. Khodieiev, “System for controlling the homogeneity of water-fuel emulsion,” *Scientific Notes of Tavria National University named after V. I. Vernadsky. Series: Technical Sciences*, no. 6, pp. 91–97, 2023, doi: 10.32782/2663-5941/2023.6/14.