



УДК 62.64

ТЕРМОСТРУМЕНЕВЕ ДОЗУВУВАННЯ ЯК МЕТОД УТВОРЕННЯ ВОДНО-ПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ

THERMAL JET DOSING AS A METHOD OF FORMING A WATER-FUEL EMULSION

¹ Заболотний О.В., ² Ходєєв А.А.

¹ Zabolotnyi O.V., ² Khodieiev A.A.

^{1,2} Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна

^{1,2} National Aerospace University named after M. E. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

ORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0001-8266-4481>, ² <https://orcid.org/0009-0000-8391-9853>

E-mail: ¹ o.zabolotnyi@khai.edu, ² khodeev.andrey99@gmail.com

Copyright © 2025 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: [10.15673/atbp.v17i3.3245](https://doi.org/10.15673/atbp.v17i3.3245)

Анотація: Роботу присвячено впровадженню альтернативного методу виготовлення водно-паливної емульсії шляхом крапельного дозування. Основною метою дослідження була розробка схеми управління термоструменевому модулю дозування дисперсної фази. У роботі описано принцип роботи термоструменевих модулів дозування та розглянуто основні керуючі сигнали. У конструкції модуля використано термоструменеву матрицю з вбудованими резистивними нагрівачами, які при подачі короткочасного електричного імпульсу генерують краплі рідини визначеного об'єму через мікросопла. Розроблено схему керування модулем на базі мікроконтролера, організацію та стабілізацію живлення, а також логіку імпульсного управління. На базі типового об'єму краплі, яку генерує модуль, розраховано можливість отримання грубої емульсії під час дозування. Була розроблена гідравлічна система виготовлення водно-паливної емульсії у реальному часі з можливістю високоточного дозування та подальшою інтеграцією з традиційними методами емульгування для утворення стабільної емульсії. Для виготовлення стабільної водно-паливної емульсії передбачено інтегрування мембранного методу до системи дозування. Описано принцип роботи мембранного емульгування з оглядом літератури, що підтверджує ефективність комбінації двох методів. Запропоновану систему реалізовано на базі програмованого логічного контролера, який поєднує всі елементи. Результати демонструють ефективність використання термоструменевому дозування для введення дисперсної фази в безперервну, що в поєднанні з мембранним емульгуванням утворює перспективну систему для виготовлення емульсії з очікуваним розміром крапель води.

Abstract: This work is devoted to the implementation of an alternative method for producing water-fuel emulsion by drop dosing. The main objective of the study was to develop a control scheme for the thermal jet module for dosing the dispersed phase. The paper describes the principle of operation of thermal jet dosing modules and considers the main control signals. The module design uses a thermal jet matrix with built-in resistive heaters, which, when a short electrical pulse is applied, generate drops of liquid of a certain volume through micro-nozzles. A microcontroller-based module control scheme, power supply organization and stabilization, as well as pulse control logic have been developed. Based on the typical volume of a drop generated by the module, the possibility of obtaining a coarse emulsion during dosing has been calculated. A hydraulic system for the real-time production of water-fuel emulsion has been developed with the possibility of high-precision dosing and subsequent integration with traditional emulsification methods to form a stable emulsion. To produce a stable water-fuel emulsion, the membrane method is integrated into the dosing system. The principle of membrane emulsification is described with a review of the literature confirming the effectiveness of combining the two methods. The constructed system is implemented on the basis of a programmable logic controller that combines all the elements. The results demonstrate the prospects of using thermal jet dosing to introduce a dispersed phase into a continuous one, which, in combination with membrane emulsification, forms a promising system for the production of emulsions with the expected water droplet size.

Ключові слова: Водно-паливна емульсія, термоструменеве дозування, емульгування, крапельне дозування, премікс емульгування, мембрана, ПЛК

Key words: Water-fuel emulsion, thermal inkjet dosing, emulsification, droplet dosing, membrane, PLC, emulsification premix



Вступ

В нас час високу актуальність має пошук альтернативних та модернізація наявних енергоносіїв з метою зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище. Основними енергоносіями являються рідинні палива, які мають широке розповсюдження в багатьох секторах економіки, таких як промисловість, транспорт та генерування енергії. Через це, раціональним підходом буде не повна відмова від використання рідинних палив, а їх модифікація, спрямована на зниження токсичних викидів, скорочення споживання та збереження підвищення теплотворної здатності без суттєвих конструктивних змін у двигунах та котлоагрегатах. Таким рішенням є використання водно-паливних емульсій (ВПЕ), зокрема водно-дизельних емульсій. Додавання водної складової до дизельного палива [1-4] призводить до зниження температури згоряння, зменшує концентрацію токсичних компонентів дизельного вихлопу (NO_x , CO , сажі). Важливими факторами для застосування ВПЕ є розмір крапель води, які мають бути рівномірно розподілені в паливі, та забезпечення оптимального співвідношення водної складової і палива, де відсоток уведеної в паливо вологи може складати до 20 % [5].

Для виготовлення ВПЕ застосовують механічні, ультразвукові та мембранні системи перемішування, які інтегруються в автоматизовані комплекси. Такі системи, як правило, включають модулі дозування, контрольно-вимірювальні датчики та керуючі елементи. Основним завданням автоматизованих комплексів з виготовлення ВПЕ є забезпечення довготривалої стабільності емульсії, а стабільність ВПЕ безпосередньо залежить від діаметру крапель води і їх рівномірному розподілу в паливі. Використання емульсії може бути дозволене лише за умови її стабільності [6-8], в той час як використання нестабільної емульсії може призвести до руйнівних пошкоджень конструкції двигунів та всієї системи генерування в цілому.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В сучасних дослідженнях експериментально підтверджено та описано ефективність використання ВПЕ як альтернативного палива. Залежно від співвідношення дисперсної та безперервної фази емульсії і методів виготовлення ВПЕ можливо забезпечити зменшення викидів окисів азоту на 20-35%, зменшити утворення диму до 20%, покращити повноту вигорання палива та, за рахунок цього, зменшити витрати останнього. Найпоширенішими методами виготовлення ВПЕ є методи з використанням механічних міксерів, ультразвукових гомогенізаторів, мембранних установок, комбінація зазначених методів, а також альтернативні способи емульгування, такі як впорскування насиченої водяної пари в дизельне паливо [9-15].

Найпоширенішим методом є використання механічних міксерів, як промислових так і лабораторних. Вони прості в експлуатації та зазвичай формують краплі діаметром від 10 мкм. Проте, лабораторні моделі типу високосузного механічного змішування можуть утворювати краплі діаметром менше 1 мкм, що займає тривалий час, потребує значних витрат енергії і використання поверхнево активних речовин (ПАР). Альтернативою виступають ультразвукові гомогенізатори, які можуть утворювати стабільну емульсію з краплями діаметром менше 1 мкм. Мембранна технологія забезпечує контрольований розподіл фаз і дозволяє утворювати емульсії з необхідним розміром крапель води за рахунок підбору пор мембрани та тиску, але вимагає попереднього змішування. Перспективним альтернативним методом є також впорскування насиченої водяної пари безпосередньо в паливо. Такий підхід забезпечує утворення крапель розміром близько 5 мкм у газорідному середовищі. Проте, після такого впорскування обов'язково необхідна стадія дегазації. Зазначені методи мають свої переваги та недоліки, але в жодному з них не приділяють уваги точному дозуванню об'єму води, призначеної для утворення емульсії.

Об'ємна частка і розмір крапель води у паливі є критичними параметрами для ефективного виготовлення ВПЕ. Тому важливим фактором стає реалізація високоточного дозування з контрольованим розміром крапель води. Створення системи, в якій дозатор буде вводити дисперсну фазу крапельним шляхом у безперервну фазу з фіксованим об'ємом та стабільним розміром краплі, дозволить вирішити дві основні задачі: забезпечити точне введення необхідного відсотка води у паливо і одночасне формування первинної емульсії з очікуваною структурою.

Впровадження крапельного дозуючого пристрою [16] дозволяє контролювати ключові параметри, що визначають ефективність і стабільність ВПЕ: розмір крапель і відсотковий вміст води у паливі.

Мета і завдання дослідження

Мета дослідження – розробка системи введення дисперсної фази (води) в безперервну фазу крапельним шляхом з очікуваним фіксованим об'ємом і діаметром краплі на основі термоструменевої технології, створення первинної емульсії шляхом такого дозування та подальша інтеграція в автоматизовану систему виготовлення стабільної ВПЕ.

Методи і матеріали досліджень

Для реалізації процесу крапельного дозування і створення емульсії запропоновано використання термоструменевих дозаторів, які працюють за технологією “крапля за вимогою”. Термоструменевий дозатор складається з ємності з рідиною та матриці, в якій розміщено канали з рідиною (сопла), причому на стінці кожного з таких сопел змонтовано резистивний нагрівач [17, 18].



Рис. 1 – Структура термоструменевого дозатора
Fig. 1 – Structure of a thermal jet dispenser

Процес термоструменевого дозування [19, 20] полягає в тому, що під час подачі короткотривалого електричного імпульсу тривалістю 3-6 мкс на резистивний нагрівач, рідина в соплі за декілька мікросекунд розігрівається до температури 300-340 °С [21]. Такий розігрів викликає майже миттєве випаровування рідини в камері сопла, утворюючи бульбашку пари. Ця бульбашка розширюється і виштовхує краплю рідини через сопло протягом декількох мікросекунд. Після того, як бульбашка руйнується, тиск у камері падає, втягуючи нову порцію рідини для наступного циклу (рис 2.), а об'єм крапель може досягати від 2 до 200 піколітрів за один цикл. Розмір краплі і її об'єм регулюють напругою, яка подається на терморезистор, та тривалістю імпульсів, які подають на резистивний нагрівач. Також розмір краплі залежить від фізичних властивостей рідини (в нашому випадку води).

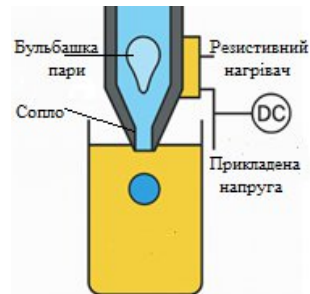


Рис. 2 – Принцип формування та викиду краплі
Fig. 2 – The principle of drop formation and ejection

Для успішного введення дисперсної фази (води) у безперервну (дизельне паливо), необхідно підібрати оптимальну напругу та тривалість імпульсів. Підвищення тривалості імпульсів призводить до більш тривалого нагрівання бульбашки, утворюючи більший тиск, що призведе до утворення більшого об'єму рідини на виході з сопла [19]. 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 новоутворених крапель і забезпечити точне дозування об'єму рідини, що уводиться в безперервну фазу.

Значною перевагою цього методу дозування є можливість створення емульсії паралельно з процесом дозування. При зануренні сопел дозатора в паливо краплі води впорскуються безпосередньо, причому завдяки маленькому розміру і сферичній формі крапель одразу відбувається локальне перемішування. Під час дозування краплі води поступово розподіляються в резервуарі з паливом і утворюють первинну емульсію.

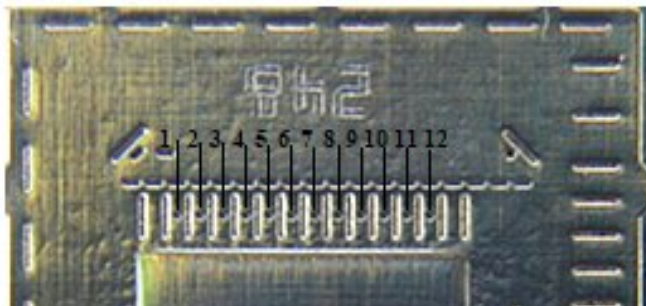


Рис. 3 – Термоструменева матриця
Fig. 3 – Thermal inkjet matrix

Для реалізації процесу дозування дисперсної фази в безперервну фазу було використано спеціальну матрицю з 12 соплами діаметром 85 мкм (Рис 3.), що має збудовані резистивні нагрівачі з опором 58 Ом [22].



Використовуючи дану матрицю згідно технічної документації, можемо реалізувати точне дозування, в процесі якого об'єм однієї краплі дорівнюватиме 160 пкл. Виходячи з цього, можемо обчислити очікуваний діаметр краплі, використавши геометричну модель ідеальної сфери (1).

$$d = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{1/3} \quad (1)$$

В формулі (1) V - об'єм краплі в m^3 . Обчислений діаметр краплі d дорівнює ≈ 67 мкм. Маючи такий діаметр краплі на виході сопел можливо утворювати грубі водно-паливні емульсії безпосередньо в процесі дозування води.

Для активації сопел потрібно згенерувати імпульс тривалістю 3 мкс з вихідною напругою 18 вольт і затримкою 0,5 мкс перед подачею імпульсу на інше сопло, та затримкою 800 мкс для уникнення перегріву нагрівального елемента на першому соплі.

Керування матрицею реалізоване з використанням плати Arduino UNO на базі мікроконтролера Atmega 328p, в якій для керування матрицею з соплами використано 11 цифрових і один аналоговий вихід, які забезпечують генерування імпульсів зазначеної конфігурації для керування модулем. Цифрові виходи плати Arduino можуть генерувати імпульси з максимальною напругою до 5 вольт, через що було додатково використано блок живлення на 24 вольт з двома DC-DC модулями перетворення напруги на базі мікросхеми LM2596, тим самим забезпечивши можливість генерування імпульсів напругою 18 В. Для перетворення напруги 5 В з виходів GPIO плати Arduino у 18 вольт було використано дві транзисторні зборки Дарлінгтона на базі мікросхеми ULN2803.

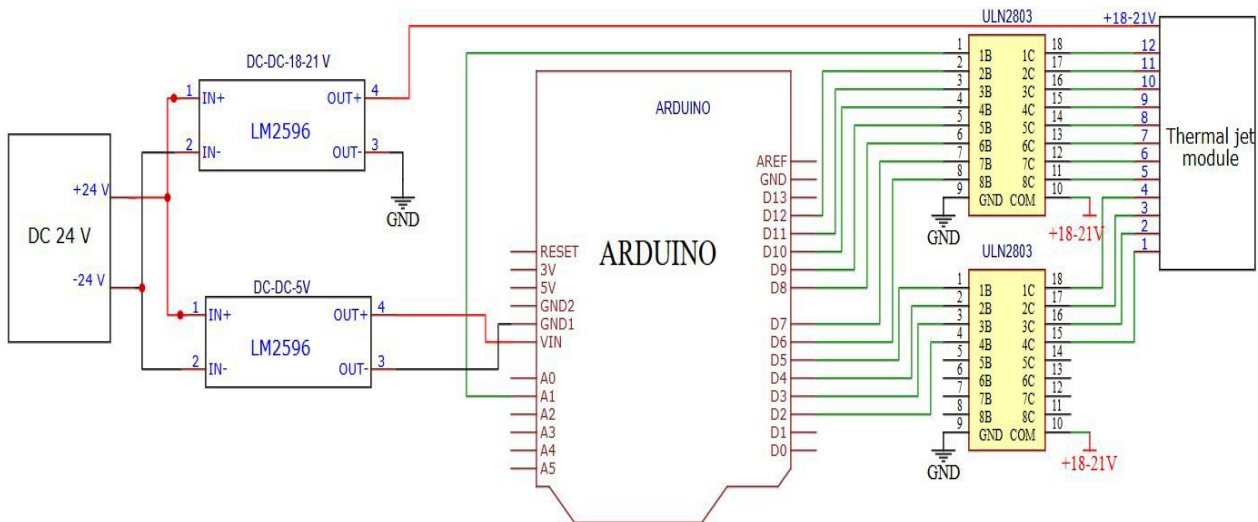


Рис. 4 Схема електрична принципова підключення термоструменевого модуля
Fig. 4. Schematic diagram of the thermal jet module connection

Використання такої схеми дало можливість регулювати вихідну напругу, що подається на термоструменевий модуль, за допомогою DC-DC перетворювача. Це дозволило корегувати потужністю нагрівальних елементів. Використання мікроконтролера дозволяє формувати потрібну тривалість імпульсів, які подають на термоструменевий модуль. Проведення серії експериментальних досліджень з використанням різних значень амплітуди вихідної напруги і тривалості імпульсів дозволило оптимізувати процес викиду краплі води та провести корегування процесу впорскування поверхнево-активних речовин для стабілізації новоутвореної емульсії.

Результати досліджень

Для реалізації процесу ефективного дозування необхідно створити гідравлічну систему, яка включає ємності для рідини, насосне обладнання для заповнення цих ємностей, датчики рівня, модуль дозування та блок керування на базі програмованого логічного контролера (ПЛК). На рисунку 5 представлено схему електричну функціональну гідравлічної системи, яка реалізує початковий етап формування грубої водно-паливної емульсії на основі крапельного дозування дисперсної фази. Систему побудовано з урахуванням автоматизованого контролю наповнення, дозування та обмеження взаємодії компонентів до завершення дозування.

Блок керування на базі ПЛК виконує ініціалізацію циклу, аналізуючи сигнали з датчиків рівня рідини в ємностях для води, палива та емульсії. Після досягнення необхідного заповнення система активує насоси, що здійснюють подавання води у дозатор та палива у ємність для змішування. Витрату рідини контролюють за допомогою частотно-регульованих насосів або аналогових виходів ПЛК.

Після завершення процесу заповнення, логіка, закладена у ПЛК, активує термоструменевий модуль дозування, який реалізує дозовану подачу води у вигляді крапель безпосередньо в паливо. Кожен цикл



формування краплі ініціюють шляхом подавання імпульсу на дозатор. Визначити уведений об'єм рідини можливо шляхом підрахунку кількості імпульсів за формулою (2):

$$V=N \cdot V_{\text{имп}}, \quad (2)$$

де N - кількість імпульсів, $V_{\text{имп}}$ - об'єм однієї краплі (160 пкл).

Потрапляючи у паливо, краплі води за рахунок малого об'єму та сферичної форми локально перемішуються з ним, утворюючи первинну емульсію.

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 розміром на рівні піколітрів, і забезпечує гарну повторюваність.

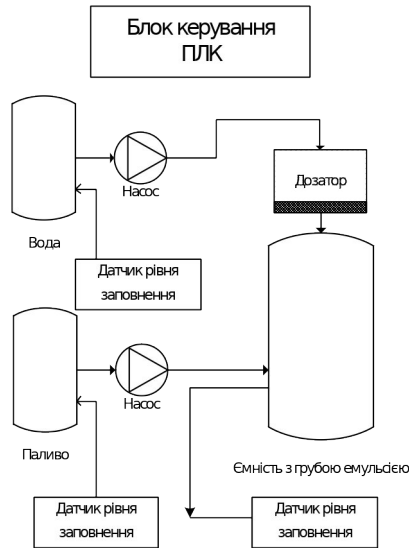


Рис. 5 – Схема електрична функціональна процесу дозування та виготовлення емульсії
Fig. 5 – Functional diagram of emulsion dosing and preparation

Це значно підвищує точність дозування на відміну від подавання води в паливо насосами або впорскування води форсунками, де в паливо потрапляє повітряно-водяна суміш з непрогнозованими формою і об'ємом крапель та з великою вірогідністю піноутворення. Запропонований принцип дозування згідно з технічною документацією та теоретичними розрахунками може забезпечити формування краплі об'ємом 160 пкл, що приблизно відповідає діаметру 67 мкм. Розрахунковий діаметр краплі є завеликим у порівнянні із стандартними методами виготовлення емульсій, де діаметр крапель води не перевищує 5 мкм. Отже, емульсія отримана в процесі дозування запропонованим способом належить до грубих (премікс) емульсій. Проте, через високу точність дозування води у формі крапель використання запропонованого принципу є доцільним. Для зменшення розміру крапель, рівномірного розповсюдження та стабілізації дисперсної фази другим етапом приготування стабільної емульсії може бути мембранне емульгування.

Пряме мембранне емульгування базується на уведенні дисперсної фази через пори мембрани для утворення крапель у безперервній фазі. Основними перевагами методу є створення дисперсних крапель малого діаметра з контрольованим розміром [23]. Зазвичай новоутворенні краплі дисперсної фази на виході мембрани є вдвічі більшими ніж діаметр пор самої мембрани. Тому мембранне емульгування найкращим чином підходить для подальшої гомогенізації грубих емульсій, в яких дисперсну фазу вже попередньо уведено в безперервну [24]. В процесі пропускання новоутвореної емульсії через мембрану краплі води з діаметром, меншим ніж діаметр пор мембрани, проходять крізь неї без опору і деформації. Краплі, діаметр яких перевищує діаметр пор мембрани, деформуються з подальшим розділенням на більш дрібні краплі. Під час взаємодії з мембраною великі краплі, що перевищують діаметр пори, піддаються розтягуванню та подрібненню у відповідності з рівнянням Лапласа, яке визначає капілярний тиск.

$$\Delta P_{\text{cap}} = \frac{4\sigma \cos\theta}{d_p}, \quad (4)$$

де σ - поверхневий натяг на межі фаз, θ - контактний кут між рідиною і поверхнею мембрани, d_p - діаметр пори мембрани.

Великий капілярний тиск, що виникає під час проходження краплі через пору мембрани, призводить до її витягування і подрібнення на дрібніші частинки. Додатковим фактором у процесі подрібнення крапель є сили



зсуву, які допомагають деформованим краплям розбиватись під час проходження скрізь пори мембрани. Їх значення можна оцінити через напруження зсуву τ_s .

$$\tau_s = \frac{\Delta P \cdot r}{\eta}, \quad (5)$$

де: ΔP - перепад тиску через мембрану, r - радіус пори мембрани, η - в'язкість рідини.

Повторне пропускання попередньо обробленої емульсії через мембрану дозволяє забезпечити подальше подрібнення крапель і підвищити однорідність розподілу крапель у безперервній фазі. Кожне наступне проходження краплі через мембрану забезпечує додаткове подрібнення завдяки впливу капілярних сил та сил зсуву, що дозволяє досягти рівномірного розподілу крапель води з очікуваним розміром дисперсної фази.

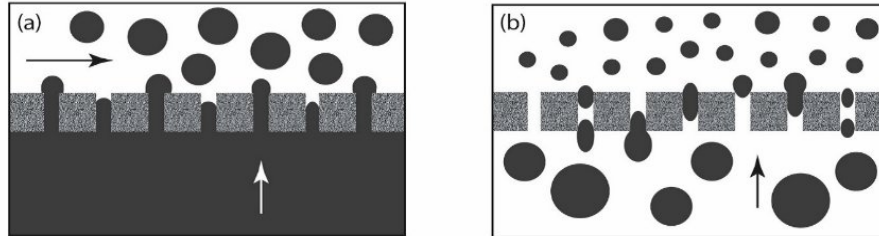


Рис. 6 – Принцип мембранного емульгування: а) пряме мембранне емульгування, б) премікс мембранне емульгування

Fig. 6 Membrane emulsification principle: a) direct emulsification, b) premix membrane emulsification

Ефективність мембранного емульгування підтверджено у різних наукових дослідженнях, де вказано, що після проходження через пори мембрани краплі дисперсної фази зменшуються після кожного повторного проходження [25]. За умови використанні мембрани з порами 0.2 мкм після п'яти проходів розмір крапель дисперсної фази зменшується до рівня 0.2 - 0.3 мкм, а за умови використання мембрани з діаметром пор 0.1 мкм розмір крапель наближується до діаметру пор мембрани. За умови використання поліпропіленових волокнистих мембран з порами 0.2 мкм і пропускання емульсії під тиском від 0.25 до 1 бар розмір крапель дисперсної фази змінюється в діапазоні від 0.24 до 0.65 мкм [26]. Таким чином, використавши мембрану з діаметром пор 1.2-1.8 мкм, і забезпечивши багаторазове проходження грубої емульсії крізь пори такої мембрани, існує можливість отримати краплі дисперсної фази оптимального розміру з більш рівномірним розповсюдженням дисперсної фази у безперервній. Отже, автоматизовану систему для формування ВПЕ має бути доповнено мембранним модулем, який забезпечить фінальний етап підготовки емульсії після крапельного дозування дисперсної фази у безперервну (доведення грубої емульсії до потрібного стану). Також доцільно інтегрувати в автоматизовану систему датчик рівня заповнення і два насоси з можливістю регулювання тиску, керовані за допомогою розширеного алгоритму, заданого у ПЛК.

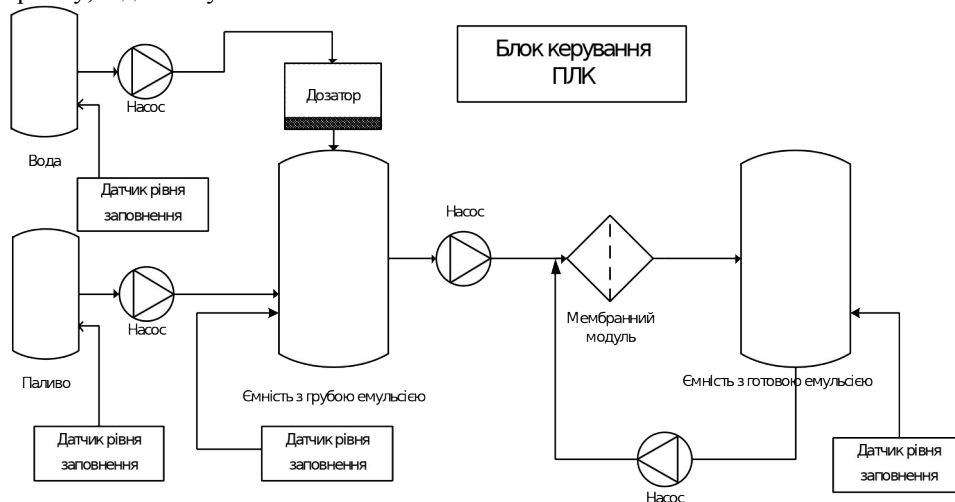


Рис. 7 – Схема електрична функціональна процесу дозування та виготовлення емульсії з мембранним модулем

Fig. 7 Functional diagram of emulsion dosing and preparation with membrane module

Після завершення процесу дозування, підтвердженого сигналом з датчика рівня, ПЛК генерує команду на насос для подачі грубої емульсії на мембранний модуль. Необхідний рівень тиску в середині мембрани задається програмно за допомогою ПЛК. Після завершення першого циклу, ПЛК подає команду на включення циркуляційного насосу для забезпечення повторного проходження через мембранний модуль. У такий спосіб



можна здійснити наперед задану кількість циклів. Це дозволяє забезпечити необхідний рівень гомогенізації емульсії, коли краплі дисперсної фази мають діаметр від 1 до 5 мкм.

Обговорення результатів

Отриманні результати демонструють можливість використання термоструменневого методу для ефективного дозування дисперсної фази і одночасного формування грубої водно-паливної емульсії. Завдяки надмалому об'єму окремих крапель на рівні піколітрів і можливістю керування параметрами кожного імпульсу, цей метод забезпечує стабільне дозування дисперсної фази з високою точністю. Але діаметр крапель на виході термоструменневого дозатора (67 мкм) є занадто великим для створення стабільної ВПЕ, через що використання лише термоструменневого методу може забезпечити точне дозування дисперсної фази і грубе (попереднє) перемішування дисперсної і безперервної фаз емульсії. Для зменшення розміру крапель до оптимального рівня (1-5 мкм), у систему додано модуль мембранного емульгування, який ефективно працює з грубими емульсіями. Наявні результати наукових досліджень підтверджують ефективність використання термоструменневого дозатора з мембранним модулем. Повторне пропускання грубої емульсії через мембрану з порами 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 наближатись до діаметра пор самої мембрани.

Розроблена система поєднує дозування і гомогенізацію в одному алгоритмі роботи, який занесено до ПЛК. Приєднання всіх елементів до структури ПЛК забезпечує автоматизоване керування процесом виготовлення емульсії з контрольованою послідовністю операцій.

Висновки

У роботі запропоновано концепцію альтернативної системи дозування дисперсної фази в безперервну на основі термоструменневого методу. Метод передбачає керовану подачу рідини у формі окремих крапель з передбачуваним діаметром та об'ємом, що дає змогу здійснювати точне регулювання співвідношення фаз та утворювати грубу емульсію. Схема керування термоструменним дозатором на базі плати Arduino UNO забезпечує можливість регулювання тривалості та кількості керуючих імпульсів, що в подальшому надасть можливість здійснювати точне дозування інших рідин. Розроблено схему електричну функціональну автоматизованої системи дозування та виготовлення емульсії. Керівним пристроєм системи є ПЛК з можливістю приєднання додаткові датчиків. Через те, що краплі, які утворюються на виході термоструменневого дозатора, мають діаметр близько 67 мкм, для подальшої стабілізації і зменшення розміру крапель до 1-5 мкм було запропоновано додати до системи модуль мембранного емульгування. Пропускання грубої емульсії через пори мембрани дозволяє зменшити розмір крапель та стабілізувати емульсію. Так, використання мембрани з порами діаметром 1-1.8 мкм дозволить зменшити розмір крапель до необхідного нам рівня 1-5 мкм.

Запропонована система поєднує точне дозування з ефективною гомогенізацією, що надає змогу утворювати стабільні емульсії, є енергоефективною, автоматизованою та відкритою до подальшої оптимізації шляхом зміни параметрів керуючих імпульсів, використання інших типів мембран або масштабування компонентів системи.

Перелік використаних джерел

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> (дата звернення: 18.05.2025).
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 NOx 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> (дата звернення: 18.05.2025).
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., Gadhav 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. Заболотний О. В., 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>.
7. Zabolotnyi O., Zabolotnyi V., Koshevoy N. Capacitive water-cut meter with robust near-linear transfer function // *Computation*. – 2022. – Vol. 10, No. 7. – P. 115. – DOI: <https://doi.org/10.3390/computation10070115>.
8. Zabolotnyi O. Moisture content control in heavy fuel during the process of emulsification with a help of capacitive sensors // *25th International Scientific Conference “Transport Means”*. – 2021. – P. 123–127.



9. 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>.
10. 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>.
11. 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>.
12. 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>.
13. 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>.
14. Kaci M., Meziane M., Kaci A., Belhaneche-Bensemra N. Emulsification by high frequency ultrasound using piezoelectric transducer: formation and stability of emulsifier-free emulsion // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2013. – Vol. 20, No. 5. – P. 1182–1187. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.02.002>.
15. Sugeng D. A., Ithnin A. M., Yahya W. J., Abd Kadir H. Emulsifier-free water-in-biodiesel emulsion fuel via steam emulsification: its physical properties, combustion performance, and exhaust emission // *Energies*. – 2020. – Vol. 13, No. 20. – P. 5406. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en13205406>.
16. 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>.
17. 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>.
18. 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>.
19. 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>.
20. Zhou H., Gué A. M. Simulation model and droplet ejection performance of a thermal-bubble microejector // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2010. – Vol. 145, No. 1. – P. 311–319. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.12.011>.
21. 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>.
22. Hewlett-Packard Development Company, L.P. HP TIJ 1.0 Transaction Print Cartridges: Data Sheet [Електронний ресурс]. – 2018. – 4 с. – Режим доступу: <https://h20195.www2.hp.com/v2/GetPDF.aspx/4AA4-2721ENW.pdf> (дата звернення: 18.05.2025).
23. Nazir A., Vladislavjević G. T. Droplet breakup mechanisms in premix membrane emulsification and related microfluidic channels // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2021. – Vol. 290. – P. 102393. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102393>.
24. Joscelyne S. M., Trägårdh G. Membrane emulsification – a literature review // *Journal of Membrane Science*. – 2000. – Vol. 169, No. 1. – P. 107–117. – DOI: [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(99\)00334-8](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(99)00334-8).
25. Gehrmann 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. – Vol. 106, No. 8. – P. 2068–2076. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2017.04.066>.
26. Ali A., Syed U. T., Bak T. S., Quist-Jensen C. A. Membrane Emulsification—A Novel Solution for Treatment and Reuse of Produced Water from Oil Field // *Membranes*. – 2022. – Vol. 12, No. 10. – P. 971. – DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes12100971>.

References

1. Bukkarapu [1] K. R. Bukkarapu, Y. Jyothi, L. S. Raju, G. C. 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.
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.
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.



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.
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.
6. O. V. Zabolotnyi and A. A. Khodiev, "Water-fuel emulsion homogeneity control system," *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, no. 6, pp. 91–97, 2023.
7. O. Zabolotnyi, V. Zabolotnyi, and N. Koshevoy, "Capacitive water-cut meter with robust near-linear transfer function," *Computation*, vol. 10, no. 7, p. 115, 2022.
8. O. Zabolotnyi, "Moisture content control in heavy fuel during the process of emulsification with a help of capacitive sensors," in *Proc. 25th Int. Sci. Conf. Transport Means*, 2021, pp. 123–127.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. M. Kaci, M. Meziane, A. Kaci, and N. Belhaneche-Bensemra, "Emulsification by high frequency ultrasound using piezoelectric transducer: formation and stability of emulsifier-free emulsion," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 20, no. 5, pp. 1182–1187, 2013.
15. D. A. Sugeng, A. M. Ithnin, W. J. Yahya, and H. Abd Kadir, "Emulsifier-free water-in-biodiesel emulsion fuel via steam emulsification: its physical properties, combustion performance, and exhaust emission," *Energies*, vol. 13, no. 20, p. 5406, 2020.
16. 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.
17. 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.
18. H. Maleki and V. Bertola, "Recent advances and prospects of inkjet printing in heterogeneous catalysis," *Catalysis Science & Technology*, vol. 10, no. 10, pp. 3140–3159, 2020.
19. S. Sohrabi and 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.
20. H. Zhou and A. M. Gué, "Simulation model and droplet ejection performance of a thermal-bubble microinjector," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 145, no. 1, pp. 311–319, 2010.
21. Y. Liu and B. Derby, "Experimental study of the parameters for stable drop-on-demand inkjet performance," *Physics of Fluids*, vol. 31, no. 3, p. 032004, 2019.
22. Hewlett-Packard Development Company, L.P., "HP TIJ 1.0 Transaction Print Cartridges: Data Sheet," 2018. [Online]. Available: <https://h20195.www2.hp.com/v2/GetPDF.aspx/4AA4-2721ENW.pdf>
23. A. Nazir and G. T. Vladislavljevic, "Droplet breakup mechanisms in premix membrane emulsification and related microfluidic channels," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 290, p. 102393, 2021, doi: 10.1016/j.cis.2021.102393.
24. S. M. Joscelyne and G. Tragardh, "Membrane emulsification – a literature review," *Journal of Membrane Science*, vol. 169, no. 1, pp. 107–117, 2000, doi: 10.1016/s0376-7388(99)00334-8.
25. S. Gehrman and H. Bunjes, "Preparation of Nanoemulsions by Premix Membrane Emulsification: Which Parameters Have a Significant Influence on the Resulting Particle Size?," *Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 106, no. 8, pp. 2068–2076, 2017, doi: 10.1016/j.xphs.2017.04.066.
26. A. Ali, U. T. Syed, T. S. Bak and C. A. Quist-Jensen, "Membrane Emulsification—A Novel Solution for Treatment and Reuse of Produced Water from Oil Field," *Membranes*, vol. 12, no. 10, p. 971, Oct. 2022, doi: 10.3390/membranes12100971.

Отримана в редакції 12.06.2025. Прийнята до друку 18.06.2025. Received 12 June 2025. Approved 18 June 2025. Available in Internet 30 June 2025