УДК 62.64
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/14

Заболотний О.В.
Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Ходєєв А.А.
Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ГОМОГЕННОСТІ ВОДНО-ПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ

Використання модифікованих палив та зменшення шкідливих викидів у навколишнє середовище є важливими науковими напрямками, які в даний час вивчаються багатьма дослідниками в усьому світі. Водно-паливні емульсії є одним з перспективних альтернативних видів палива, а їх використання забезпечує зменшення кількості шкідливих вихлопних газів, особливо оксидів азоту та твердих частинок. Головним фактором для використання водно-паливних емульсій як альтернативного енергоносія є гомогенність емульсії, тобто її стабільність у часі. Наразі гомогенність емульсії перевіряється шляхом взяття зразків для аналізу. Цей процес займає певний час і потребує залучення додаткових людських ресурсів. В даній роботі описано автоматичну систему контролю гомогенності емульсії. Вона складається з сенсорів каламутності, які монтуються в наявні ємності для збереження емульсії, електронного модуля та програмованого логічного контролера. Розроблено експериментальний стенд для перевірки основних метрологічних характеристик сенсорів каламутності за стандартними зразками суспензії каоліну, які покривають увесь діапазон вимірювання. Експериментальні дослідження показали, що сенсори каламутності мають великий діапазон вимірювання, високу чутливість та мають близьку до лінійної характеристику перетворення сигналу. Використання сенсорів каламутності дозволяє фіксувати етапи руйнування емульсії, такі як седиментація, коалесценція та повне розшарування на дві рідини. Фіксація моменту руйнування емульсії у реальному часі надає можливість застосовувати три різні режими для відновлення гомогенності емульсії шляхом повторного перемішування з різними часовими інтервалами. Це забезпечить суттєве зменшення часу на відновлення гомогенності водно-паливної емульсії. Запропоновану систему можливо інтегрувати у більшість наявних установок для виготовлення та збереження водно-паливних емульсій.

Ключові слова: *водно-паливна емульсія, гомогенність, сенсор, каолін, статична характеристика перетворення, програмований логічний контролер,перемішування, виконуючі пристрої.*

Постановка проблеми. В наш час широко розвивається пошук перспективних альтернативних видів палива для використання у промислових, транспортних та енергогенеруючих галузях, для підвищення технічних та екологічних показників під час використання рідких палив. Одним із перспективних енергоносіїв є водно-паливна емульсія [1] (ВПЕ) використання якої [2–6] підвищує ефективність згорання палива, забезпечує зменшення кількості шкідливих викидів та дозволяє зменшити витрату палива за рахунок його змішування з водою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На даний час процес виготовлення ВПЕ широко досліджується та модернізується, було розроблено багато найрізноманітніших установок для створення ВПЕ які використовують різні методи для виготовлення емульсій [7–11] та різний набір інгредієнтів для прискорення процесу виготовлення та підвищення стабільності. В сучасних установках для приготування емульсій використовується значна кількість контрольно-вимірювальної апаратури для керування процесу виготовлення, але не враховується один з найважливіших факторів, а саме контроль її гомогенності після приготування та під час збереження (транспортування). Стабільність емульсії необхідно підтримувати постійно, адже коли емульсія втратить свою гомогенність, вона повністю втратить усі переваги від використання і почне нести руйнівний характер для двигунів через обводнення палива [12–17].

Постановка завдання. Існує багато методів для контролю стабільності емульсії, але більшість цих методів використовується у лабораторних умовах або близьких до них шляхом взяття проб для аналізу. Тому виникає необхідність

розроблення автоматизованої системи контролю гомогенності емульсії, яку можна використовувати в наявних установках для виготовлення, збереження та транспортування водно-паливних емульсій.

Виклад основного матеріалу. Для контролю гомогенності водно-паливної емульсії може бути використаний електронний модуль TS-300B сумісно з сенсором TSW-30 [18, 19] для вимірювання каламутності (рис. 1).

Рис. 1. Зовнішній вигляд електронного модуля TS-300B та сенсора каламутності TSW-30

Принцип роботи сенсорів базується на вимірюванні інтенсивності світлового потоку, розсіяного зваженими частинками речовини, що досліджується, з'являється можливість зробити прив'язку до стандартних одиниць вимірювання каламутності NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

До складу ВПЕ входить паливо і водна складова, які окремо є прозорими рідинами, що сприяє безперешкодному проходженню світлового потоку. Після приготування емульсії утворюється гомогенна рідина, в якій у безперервній фазі (паливі) рівномірно розподілені зважені частинки дисперсної фази (води), в наслідок чого новостворена ВПЕ втрачає свою прозорість, що перешкоджає проходженню світлового потоку. Через це з'являється можливість фіксувати момент розшаровування в місці встановлення сенсорів, бо під час злиття зважених частинок з'являтимуться зони, в яких буде полегшено проходження світлового потоку.

Використовуючи електронний модуль TS-300B з'являється можливість контролювати гомогенність рідини у реальному часі. Коли рівень сигналу на виході модуля є близьким до 0 В, емульсію вважають гомогенною, а при високому рівні сигналу в діапазоні від 3,7 В до 4.5 В можна вважати, що відбулося повне розшарування.

Було проведено серію дослідів для оцінки рівня чутливості сенсорів каламутності. Для цього обрано одну з стандартних методик для калібрування сенсорів каламутності за стандартними сумішами каоліну [19, 20]. При приготуванні стандартних суспензій використовували мірні ємності, механічний міксер потужністю 10000 об/хв та електронні ваги з роздільною здатністю 0.01 г. Також було використано дистильовану воду та каолін вищого ступеня очищення (рис 2).

Під час досліджень були виготовлені стандартні суспензії із вмістом каоліну у таких пропорціях: 50, 100, 200, 500, 700, 1562, 3125, 6250, 7812, 9375 мг/л. Вони покривають повний діапазон вимірювання сенсора TSW-30 який складає ≥ 3000 NTU.

Для експериментальних досліджень чутливості сенсорів був розроблений стенд, до складу якого увійшли: мірні ємності, три первинних сенсори TSW-30, електронний модуль TS-300B, блок живлення із можливістю регулювання напруги в діапазоні від 4.2 до 5.2 В та мультиметр в режимі вимірювання напруги (рис. 3).

Рис. 2. Процес приготування стандартної суспензії

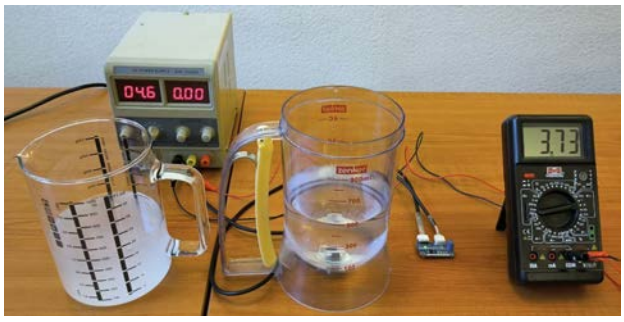

Рис. 3. Лабораторний стенд для вимірювання каламутності

Спершу сенсори занурювали в очищену або дистильовану воду для фіксації нульової точки

діапазону вимірювання, з одночасною фіксацією її температури, значення якої буде потрібне для корекції результатів вимірювань. В процесі досліджень використано дистильовану воду з температурою 25°С, тому надалі корекція температури не проводилась, для відмінних від 25°С значень температури необхідно уводити температурну поправку. Після чого були проведенні спостереження на усіх виготовлених суспензіях використовуючи 3 сенсори (було реалізовано десять окремих спостережень для кожного зразка (табл. 1).

Таблиця 1

Середнє значення вихідної напруги сенсорів каламутності

С, мг/л	$\bar{U}$ сенсор 1, В	$\bar{U}$ сенсор 2, В	$\bar{U}$ сенсор 3, В
0	3,68	3,74	3,74
50	3,651	3,706	3,724
100	3,627	3,672	3,698
200	3,592	3,642	3,657
500	3,515	3,561	3,562
700	3,375	3,413	3,483
1562	3,032	3,027	3,158
3125	2,457	2,398	2,612
4687	1,885	1,799	1,898
6250	1,232	1,165	1,4
7812	0,748	0,705	0,888
9375	0,08	0,07	0,122

Після проведення вимірювань необхідно обчислити коефіцієнт К, який може відрізнятись залежно від партії виготовлених сенсорів, умов навколишнього середовища, навколишнього освітлення при використанні прозорих ємностей. Також одним із суттєвих факторів, який може впливати на покази сенсорів, є вхідна напруга живлення електронного модуля.

Розрахуємо нульову точку вимірювання для кожного з трьох сенсорів.

$$K = 865,68 * U_0. \quad (1)$$

Після чого необхідно здійснити підстановку значень К [19, с. 191] у формулу для обчислення каламутності в стандартних одиницях вимірювання (NTU).

$$NTU = -865,68 * U + K. \quad (2)$$

Отримані значення залежності концентрації, вираженої у мг/л, до значень каламутності в одиницях NTU (табл. 2), мають характер зміни, близький до лінійного. Проведено порівняння отриманих результатів з даними роботи [20], де наведено результати контрольних спостережень каламутності у розчинах каоліну з використанням спеціальних засобів вимірювання (Hydrolab DS5X, OTT Hydromet GmbH, Kempten, Germany) для визначення каламутності. Результати такого порівняння наведено на рисунку 4.

Таблиця 2

Співвідношення концентрації у мг/л і значень NTU

С,мг/л	NTU сенсор 1	NTU сенсор 2	NTU сенсор 3	NTU Hydrolab DS5X
0	0	0	0	0
50	25,1	29,07	13,49	16
100	45,87	58,51	36	32
200	76,17	84,48	71,49	64
500	142,83	154,6	153,73	160
700	264,03	282,72	222,12	224
1562	560,95	616,87	503,47	500
3125	1058,72	1161,38	976,13	1000
4687	1553,89	1679,93	1594,22	1500
6250	2119,18	2228,77	2025,33	2000
7812	2538,17	2626,98	2468,56	2500
9375	3116,44	3176,69	3131,67	3000

Через великий діапазон вимірювання сенсора TSW-30 з'явилась необхідність розрахувати нову функцію для отримання статичної характеристики перетворення. Було реалізовано апроксимацію значень, наведених в таблиці 2, методом найменших квадратів (поліномом першого порядку).

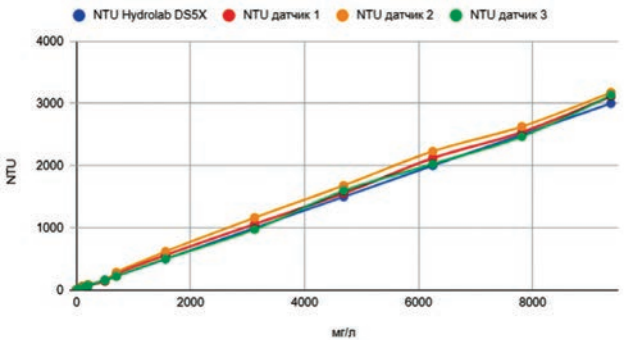

Рис. 4. Залежність каламутності рідини (NTU) від концентрації каоліну

Розраховані середні значення показників NTU для трьох сенсорів наведено у таблиці 3.

Були визначені параметри *a* і *b* апроксимуючого полінома першого порядку, де

$$a = 14,426,$$

$$b = 0,3325.$$

Теоретична лінійна модель залежності каламутності рідини (NTU) від значень концентрації каоліну (мг/л) має вигляд:

$$a + b*\text{C} = \text{NTU} \quad (4)$$

Теоретичні значення NTU для кожної точки С записані у таблиці 4.

Таблиця 3

Середні значення показників NTU з трьох сенсорів

С, мг/л	$\overline{NTU}$
0	0
50	22,55
100	46,79
200	77,38
500	150,38
700	256,29
1562	560,43
3125	1065,41
4687	1609,34
6250	2124,42
7812	2544,57
9375	3141,6

Таблиця 4

Теоретичні значення NTU контрольних точок концентрації каоліну

С, мг/л	$\overline{NTU}$
0	14,42
50	31,05
100	47,67
200	80,92
500	180,67
700	247,17
1562	533,79
3125	1053,48
4687	1572,85
6250	2092,55
7812	2611,916
9375	3131,61

Побудовані графіки порівняння результатів, отриманих під час досліджень, та результатів, отриманих після апроксимації зображено на рисунку 5.

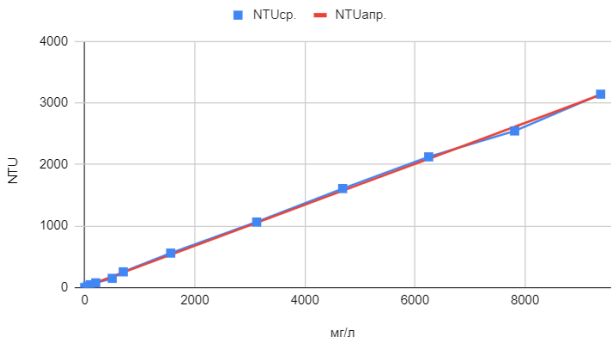

Рис. 5. Порівняння експериментальних та теоретичних розрахунків

На рисунку 5 видно, що формула (4) здійснює якісну апроксимацію результатів експериментальних досліджень.

Аналіз результатів експериментів показав, що сенсор TSW-30 разом з електронним модулем TS-300 B забезпечує великий діапазон вимірювання каламутності (до 3000 NTU) і високу чутливість у порівнянні з аналогами, що викликало необхідність уточнення номінальної статичної характеристики перетворення.

Сенсор з електронним модулем може використовуватись для дослідження та фіксації моменту розшарування ВПЕ. Контролюючи напругу на виході електронного модуля TS-300 B, можна приймати рішення щодо запуску повторного перемішування емульсії та її повернення до гомогенного стану в автоматичному режимі.

Для створення системи контролю гомогенності ВПЕ необхідно використати додатковий електронний блок, який буде опитувати виходи сенсорів, здійснювати обробку отриманих сигналів та генерувати керуючі команди на виконуючі пристрої. Таким блоком може бути програмований логічний контролер (ПЛК).

Принцип роботи системи базується на розділенні ємності з ВПЕ на три умовні зони, в яких будуть вмонтовані сенсори каламутності. В кожній зоні здійснюють моніторинг стабільності емульсії в реальному часі. Аналогові виходи електронних модулів TS-300 B підключають до аналогових входів ПЛК, де вихідна напруга буде перетворена з використанням формули (2) для відображення значень у одиницях NTU. Сенсори каламутності попередньо калібрують у нульовій точці в умовах, близьких до експлуатаційних, з визначенням коефіцієнту K для кожного з них (1). Після обробки даних на ПЛК за допомогою дискретного виходу формуються вихідні сигнали, які передають команди на керуючі пристрої для запуску відповідного режиму відновлення гомогенності емульсії. За потреби можна відображати стан емульсії на панелі оператора (рис. 6).

Ємність з емульсією умовно поділяється на три зони, де перший сенсор монтується зверху, другий по середині, а третій на дні ємності, що дозволить зафіксувати момент втрати гомогенності емульсії [21]. Рівномірне розміщення трьох сенсорів дозволить фіксувати повний процес розшарування ВПЕ (схематично процес розшарування зображено на рис. 7).

У новоутвореній гомогенній емульсії сигнали з виходу модуля будуть наближатись до 0 В. Зважені частинки води будуть рівномірно розповсюдженні у паливі, що перешкоджатиме проходженню світлового потоку. На початку розшарування емульсії розпочнеться процес седиментації. Повного

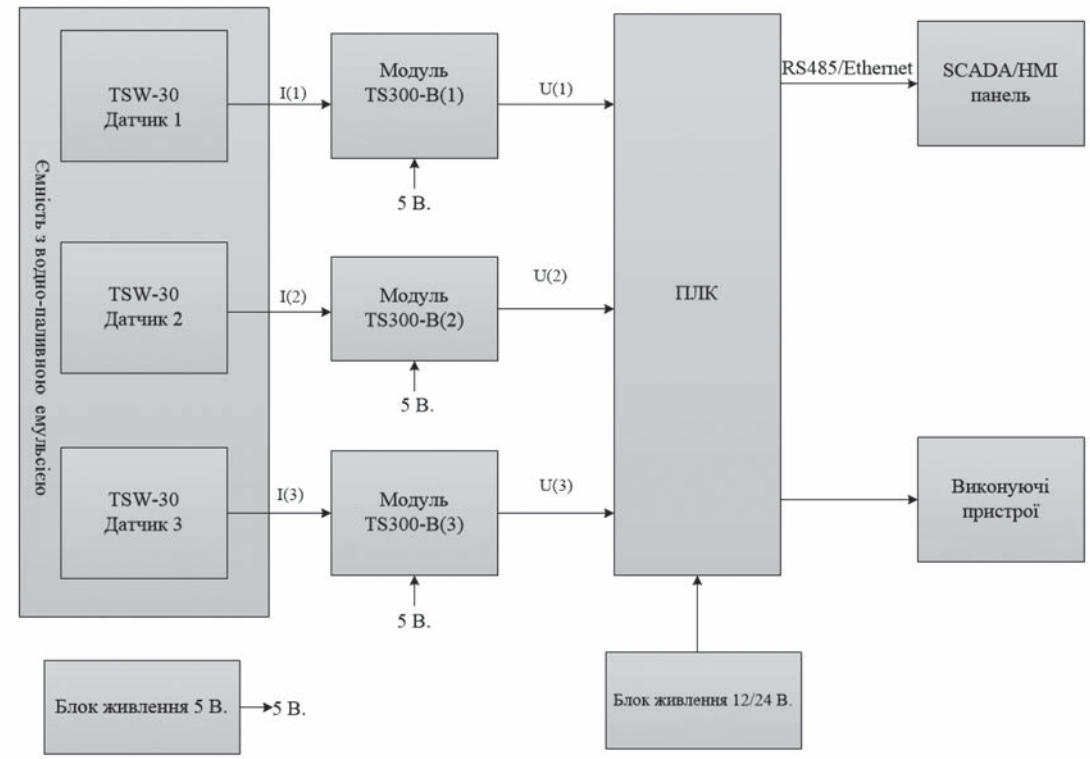

Рис. 6. Схема електрична структурна системи контролю гомогенності ВПЕ

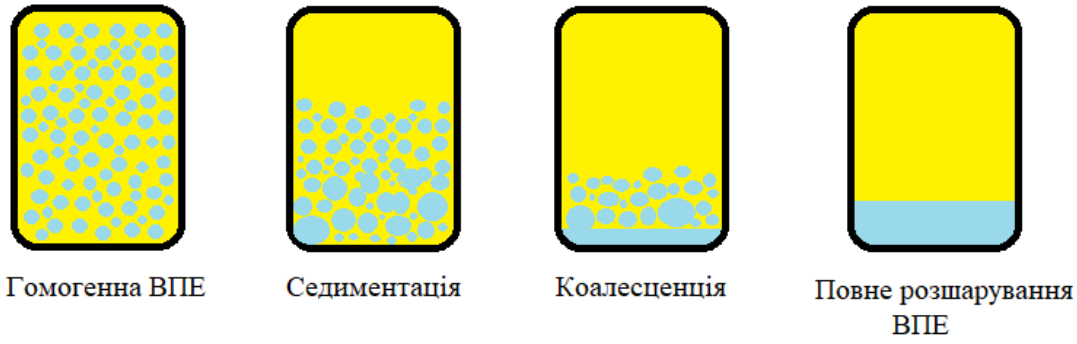

Рис. 7. Схематичне зображення процесу розшарування ВПЕ

руйнування емульсії не відбувається, утворюються дві емульсії, одна з яких є має більшу концентрацію дисперсної фази, ніж інша. Саме під час цього процесу сигнали з усіх трьох сенсорів почнуть суттєво змінюватись за рахунок розповсюдження випромінюваного світлового потоку у рідині. Наступним етапом є коалесценція, тобто початок повного руйнування емульсії (виділення в чистому виді обох фаз рідини через об'єднання крапель дисперсної фази). Під час коалесценції сигнали сенсорів змінятся, і сигнал з виходу сенсора, розміщеного на дні ємності, буде максимальним. Сигнали на виходах середнього та верхнього сенсорів будуть поступово зростати залежно від насиченості дисперсної фази у зоні їх чутливості. Після повного розшарування емульсії вихідна напруга на виходах середнього та верхнього сенсорів буде також дорівнювати максимальному значенню напруги. Це буде свідчити про повну втрату гомогенності ВПЕ.

Через те, що всі системи для приготування емульсії споживають велику кількість енергії, оптимальним буде використовувати різні режими повторного перемішування, алгоритм включення яких буде реалізований у ПЛК. Знаючи, на якому з етапів розшарування знаходиться ВПЕ, можна використовувати три режими, які надають можливість зменшити час на повторну стабілізацію емульсії шляхом повторного механічного перемішування.

Під час запуску системи аналізують усі вихідні напруги на виходах сенсорів та фактичний стан емульсії. Його можна поділити на 4 основних типи та впровадити для кожного типу відповідний режим перемішування залежно від потреб у використанні:

– стабільна емульсія – повторне перемішування не потрібне;

– седиментація – з'являється необхідність провести повторне механічне перемішування, витрачаючи від 15 до 35% від основного часу приготування, для повторного подрібнення та рівномірного розповсюдження дисперсної фази;

– коалесценція – почався процес руйнування ВПЕ, має місце виділення двох фаз рідини, необхідний процес перемішування тривалістю від 50 до 80% від основного часу для рівномірного розподілення рідин з подальшим розповсюдженням та утворенням зважених частинок дисперсної фази необхідного розміру;

– повне розшарування емульсії – повторити стандартний процес виготовлення ВПЕ.

Отже, для збереження часу та витраченої енергії можна використати три різні режими для відновлення гомогенності і оптимізувати процес виготовлення та збереження ВПЕ.

Висновки. В даній роботі було здійснене дослідження працездатності та чутливості сенсора TSW-30 сумісно з електронним модулем TS-300B для створення системи контролю гомогенності з подальшою інтеграцією у автоматизовану систему виготовлення та збереження ВПЕ. Перевірка чутливості та працездатності проводилась на стандартних розчинах каоліну, і показала, що цей сенсор має великий діапазон вимірювання каламутності (до 3000 NTU) і високу чутливість. Але через збільшений діапазон вимірювання виникла необхідність отримати уточнену номінальну статичну характеристику перетворення. Сенсор TSW-30 сумісно з електронним модулем TS-300B може використовуватись для контролю втрати гомогенності і фіксації процесів седиментації, коалесценції та повного розшарування ВПЕ. Фіксація процесів розшарування емульсії дозволяє впровадити три різні режими відновлення гомогенності, що дозволить скоротити час та зменшити витрату енергії на стабілізацію наявних емульсій.

У роботі запропоновано структурну схему системи контролю гомогенності ВПЕ. Структурна схема включає містить ключові компоненти системи, такі як сенсори TSW-30, розміщені у трьох точках ємності з емульсією, модулі TS-300 B, ПЛК, у якому реалізований алгоритм роботи з функцією зберігання та обробки даних, HMI панель для додаткової фізичної візуалізації, а також керуючі пристрої, що ініціюють повторне перемішування наявної ВПЕ. Використання запропонованої системи дозволяє підвищити продуктивність за рахунок значної економії часу та енергії на підтримання гомогенності емульсії безпосередньо перед транспортуванням або використанням.

Список літератури:

1. Patel, K. R., Dhiman, V. Research study of water-diesel emulsion as alternative fuel in diesel engine–an overview. Int. J. Latest Eng. Res. Appl, 2(9), 2017. Pp. 37–41.

2. Patel, N. S., Modi, M. A., Patel, T. M., Investigation of Engine Performance using Emulsified Diesel fuel. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). Vol. 14, 2017. Pp. 79–87.

3. Jeyakumar, S., Raja, S., BK, R. B., Yadav, S. Study on reduction of NOx in diesel engine using diesel-water emulsion method. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Vol. 5, 2018. Pp. 1509–1512.

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, Vol. 8, 2018. Pp. 933-942. https://doi.org/10.1051/matecconf/201822504022.

5. Mahmood, A. S., Qatta, H. I., Hussein, N. F., & Ismaeel, A. A. Effect of using diesel-water emulsion as a fuel on diesel engine emissions: An experimental study. International Journal of Energy and Environment, 10(6), 2019. Pp.321-328.

6. Bukkarapu, K. R., Jyothi, Y., Raju, L. S., Babu, G. C., & Narayanan, K. A Review on Current Trends in Water in Oil Emulsions. International journal of mechanical engineering and technology, 8(4), 2017. Pp. 359–371.

7. Заболотний О. В., Ходєєв А. А. Дослідження сучасних методів створення водно-паливної емульсії //The 5 th International scientific and practical conference "Science and technology: problems, prospects and innovations". (February 16-18, 2023). Osaka, Japan.

8. Ahmed Taha, Eman Ahmed, Amr Ismaiel, Muthupandian Ashokkumar, Xiaoyun Xu,Siyi Pan, Hao Hu, Ultrasonic emulsification: An overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions, Trends in Food Science & Technology, Vol. 105, 2020. Pp. 363–377.

9. Seungchul W., Woongil K., Jungkoo L., Kihyung L., Fuel properties of water emulsion fuel prepared using porous membrane method for low pollutant engine at various temperatures, Energy Report, Vol.7, 2021. Pp. 6638–6650.

10. Kojima K., Kojima J., On-Board Ultrasonic Water-in-Diesel Emulsion (WiDE) Fuel System for Low-Emission Diesel Engine Combustion, The Ohio Journal of Science, Vol.118, 2018. Pp. 44–56.

11. Dhani Avianto Sugeng, Ahmad Muhsin Ithnin, Wira Jazair Yahya, Hasannuddin Abd Kadir Emulsifier-Free Water-in-Biodiesel Emulsion Fuel via Steam Emulsification: Its Physical Properties, Combustion Performance, and Exhaust Emission. Energies, Vol.13, 2020. Pp. 5406.

12. Patil, H., Gadhave, A., Mane, S., Waghmare, J. Analyzing the stability of the water-in-diesel fuel emulsion. Journal of Dispersion Science and Technology, 36(9), 2014. Pp. 1221–1227. https://doi.org/10.1080/01932691.2014.962039

13. Akbari, S., Nour, A. H. Emulsion types, stability mechanisms and rheology: A review. 1 (1), 2018. Pp. 14–21.

14. Zabolotnyi, O.; Zabolotnyi, V. & Koshevoy, N. Capacitive Water-Cut Meter with Robust Near-Linear Transfer Function. Computation. 2022. (10). DOI:10.3390/computation10070115.

15. 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, October 6–8, 2021. Kaunas, Lithuania.

16. Alvarado, V., Wang, X. & Moradi, M. (2011). Stability Proxies for Water-in-Oil Emulsions and Implications in Aqueous-based Enhanced Oil Recovery. Energies. (4). 2011. Pp. 1058–1086. DOI:10.3390/en4071058

17. Singh, G., Lopes, E, Hentges, Ns & Ratner, A. Experimental Investigation of Water Emulsion Fuel Stability. Energies, 4(7), 2019. P. 1058–1086.

18. TS-300B High Quality Arduino Turbidity Sensor URL: https://www.innovatorsguru.com/ts-300b-arduino-turbidity-sensor (дата звернення 06.11.2023).

19. Заболотний, О., 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

20. Isoyama, R., Taie, M., Kageyama, T., Miura, M., Maeda, A., Mori, A. & Lee, S. A Feasibility Study on the Simultaneous Sensing of Turbidity and Chlorophyll a Concentration Using a Simple Optical Measurement Method, Micromachines 2017, 8(4), DOI:10.3390/mi8040112.

21. Costa C., Medronho B., Filipe A., Mira I., Lindman B., Edlund H., Norgren M. Emulsion Formation and Stabilization by Biomolecules: The Leading Role of Cellulose. Polymers.2019;11(10):1570. https://doi.org/10.3390/polym11101570

Zabolotnyi O.V., Khodieiev A.A. **WATER-FUEL EMULSION HOMOGENEITY CONTROL SYSTEM**

The need for more efficient fuels and a less polluted environment are important areas of research currently being studied by many researchers around the world. Water-fuel emulsion is one of the promising alternative types of fuel. It reduces the amount of harmful exhaust gases, especially nitrogen oxides and particulate matter. The main factor for the use of water-fuel emulsions as an alternative energy carrier is the homogeneity of the emulsion, that is, its stability over time. Currently, emulsion homogeneity is checked by taking samples for analysis. This process takes time and requires additional human resources. This paper describes an automatic system for monitoring emulsion homogeneity. It consists of turbidity sensors that are mounted in existing emulsion storage tanks, an electronic module, and a programmable logic controller. An experimental bench was developed to test the main metrological characteristics of the turbidity sensors using standard kaolin suspension samples covering the entire measurement range. Experimental studies have shown that turbidity sensors have a large measuring range, high sensitivity and have a close to linear signal conversion characteristic. The use of turbidity sensors allows recording the stages of emulsion breakdown, such as sedimentation, coalescence and complete separation into two liquids. Fixing the moment of emulsion breakdown in real time makes it possible to apply three different modes to restore emulsion homogeneity by repeated stirring at different time intervals. This will significantly reduce the time to restore the homogeneity of the water-fuel emulsion. The proposed system can be integrated into most existing facilities for the production and storage of water-fuel emulsions.

Key words: *water-fuel emulsion, homogeneity, sensor, kaolin, static characteristics of transformation, programmable logic controller, mixing, executing devices.*