

ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

Науково-технічний журнал

№ 2, 2025

Заснований у січні 1960 р. Виходить друком 4 рази на рік (том 83)

Зміст

Паливо та енергетика

- 5 **Soroka B.S., Zgurskyi V.O.** Selection the fuel composition for industrial furnaces to control the climate impact. Part 1. Decarbonization of environment by natural gas admixing with hydrogen in conditions of hybrid energy supply of industry
- 22 **Матвійчук О.С., Щудло Т.С., Дунаєвська Н.І.** Стимулювання сумісного спалювання біомаси та вугілля

Енергозберігаючі технології

- 33 **Клименко В.М., Супрун Т.Т., Олійник Є.М.** Техніко-економічна оцінка використання «зеленого» водню для виробництва синтетичного відновлюваного метану
- 42 **Безродний М.К., Пригула Н.О., Вовк В.В.** Теплонасосні установки сушіння зерна. Базові методи підвищення ефективності процесів сушіння зернових
- 54 **Melnyk O.M., Onishchenko O.A., Savelieva I.V., Prabowo A.R., Bulgakov M.P., Ocheretna V.P., Korobkova O.M.** Innovative approaches to improving the energy efficiency of ships: analysis of methods and technologies
- 69 **Ободович О.М., Целень Б.Я., Степанова О.Є., Недбайло А.Є., Булій Ю.В.** Дослідження реологічних показників водомазутних емульсій в залежності від технічних засобів та технологічних параметрів їх приготування

Очищення та переробка відходів

- 79 **Рохман Б.Б., Халатов А.А., Кобзар С.Г.** Осциляційний режим піролізу частинок берези та допоміжне обладнання установки термохімічної переробки біомаси
- 97 **Лис С.С., Вашкурак Ю.З.** Моделювання та оптимізація процесу газифікації суміші деревини та деревинно-стружкових плит

Захист навколишнього середовища

- 107 **Semykin S.I., Golub T.S., Molchanov L.S., Dudchenko S.O., Vakulchuk V.V.** Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters
- 116 **Horianoï S.V., Raschepkin V.A., Volchyn I.A., Yasynetskyi A.O.** Modelling of the process of combined cleaning of a flue gas from particulate matter and sulphur dioxide in a Venturi tube and cyclone-type scrubber
- 132 **Приймак О.В., Макаренко Л.І.** Прогнозування параметрів очисника повітря з інтегрованим теплообмінником як елемент енергозберігаючих заходів

Устаткування та прилади

- 145 **Mikulionok I.O.** Structural and technological design of the regenerative heat exchange process
- 168 **Ismayilov G.G., Ismayilova F.B., Nagizadeh A.** Advanced resource operation of main natural gas pipeline using CFD modeling methods

Нанотехнології для енергетики

- 176 **Котов В.Г., Ховавко О.І., Святенко О.М.** Одержання технологічного газу шляхом газифікації деревного вугілля для синтезу вуглецевих наноматеріалів

Відповідальний секретар — Ільєнко Борис Кузьмич

Провідний редактор — Світна Олена Миколаївна

Матеріали номера затверджено Вченою радою Інституту газу НАНУ, протокол № 5 від 06.06.2025.

Підписано до друку 09.09.2025. Формат 84 × 108/16. Папір мел. Друк офс. Наклад 130 прим.

Надруковано ТОВ «Лазурит Поліграф», вул. Леванєвського, 8/7, 03058 Київ, Україна, тел.: (044) 417 21 70.

ENERGY TECHNOLOGIES AND RESOURCE SAVING

Scientific-Technical Journal

№ 2, 2025

Founded in January, 1960. Comes out 4 times a year (volume 83)

Contents

Fuel and Energetics

- 5 **Soroka B.S., Zgurskyi V.O.** Selection the fuel composition for industrial furnaces to control the climate impact. Part 1. Decarbonization of environment by natural gas admixing with hydrogen in conditions of hybrid energy supply of industry
- 22 **Matviichuk O.S., Shchudlo T.S., Dunayevska N.I.** Promoting of biomass and coal co-firing

Energy saving technologies

- 33 **Klymenko V.N., Suprun T.T., Oliinyk Ye.N.** Feasibility study of the use of “green” hydrogen for the production of synthetic renewable methane
- 42 **Bezrodny M.K., Prytula N.O., Vovk V.V.** Heat pump grain drying plants. Basic methods for increasing the efficiency grain drying processes
- 54 **Melnyk O.M., Onishchenko O.A., Savelieva I.V., Prabowo A.R., Bulgakov M.P., Ocheretna V.P., Korobkova O.M.** Innovative approaches to improving the energy efficiency of ships: analysis of methods and technologies
- 69 **Obodovych O.M., Tselen B.Ya., Stepanova O.Ye., Nedbailo A.Ye., Bulii Yu.V.** Research of the rheological indicators of water-oil emulsions depending on the technical equipment and the technological parameters of their preparation

Waste treatment and recycling

- 79 **Rokhman B.B., Khalatov A.A., Kobzar S.G.** Oscillating mode of the birch particles pyrolysis and auxiliary equipment of the thermochemical biomass processing plant
- 97 **Lys S.S., Vashkurak Yu.Z.** Modeling and optimization of the gasification process of a mixture of wood and wood-based particleboard

Environment protection

- 107 **Semykin S.I., Golub T.S., Molchanov L.S., Dudchenko S.O., Vakulchuk V.V.** Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters
- 116 **Horianoï S.V., Raschepkin V.A., Volchyn I.A., Yasynetskyi A.O.** Modelling of the process of combined cleaning of a flue gas from particulate matter and sulphur dioxide in a Venturi tube and cyclone-type scrubber
- 132 **Pryimak O.V., Makarenko L.I.** Forecasting the parameters of an air purifier with an integrated heat exchanger as an element of energy saving measures

Equipment and devices

- 145 **Mikulionok I.O.** Structural and technological design of the regenerative heat exchange process
- 168 **Ismayilov G.G., Ismayilova F.B., Nagizadeh A.** Advanced resource operation of main natural gas pipeline using CFD modeling methods

Nanotechnology for power industry

- 176 **Kotov V.G., Khovavko O.I., Sviatenko O.M., Nebesniy A.A.** Production of process gas by charcoal gasification for carbon nanomaterial synthesis

УДК 665.6/.7
DOI: 10.33070/etars.2.2025.06

Ободович О.М.¹, докт. техн. наук, проф., ORCID: 0000-0001-7213-3118,
Цельнє Б.Я.¹, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0001-5213-0219,
Степанова О.Є.¹, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-7179-7251,
Недбайло А.Є.¹, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-8590-5823,
Булій Ю.В.^{1,2}, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-1905-3706

¹ **Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України**
вул. Марії Капніст, 2а, 03057 Київ, Україна, e-mail: tdsittf@ukr.net

² **Національний університет харчових технологій**
вул. Володимирська, 68, 01601 Київ, Україна, e-mail: yobuliy@gmail.com

Дослідження реологічних показників водомазутних емульсій в залежності від технічних засобів та технологічних параметрів їх приготування

Анотація. Виконано аналіз залежності густини та в'язкості водомазутної емульсії не лише від температури, кількісного вмісту у ній водної фази, але й від технічних засобів та технологічних параметрів її приготування. Метою роботи є дослідження зміни реологічних

показників водомазутних емульсій від використаного обладнання та технологічних параметрів приготування. Високий ступінь диспергування забезпечується гідродинамічними факторами та механічним впливом на частинки гетерогенного середовища, яке полягає в ударних, зсувних та абразивних навантаженнях при безпосередньому контакті дисперсій з робочими елементами роторно-пульсаційного апарата. Як базова модель апарата використовується конструкція циліндричного типу, що складається з трьох коаксіально-розміщених циліндричних елементів: двох статорів та ротора, що обертається між ними. Встановлено залежності зміни густини та в'язкості водомазутної емульсії від обробки в роторно-пульсаційному апараті при різних частоті пульсацій потоку та кількості циклів обробки. Доведено, що в'язкість водомазутної емульсії залежить від розміру середнього діаметра крапель дисперсної фази (води), що змінюється в залежності від параметрів обробки. Збільшення кількості циклів обробки від 1 до 5 при частоті пульсацій потоку від 1 до 4 кГц в залежності від кількості водної фази може підвищити в'язкість у 1,1–1,8 разів. При проектуванні та експлуатації паливних господарств з урахуванням приготування в них водомазутної емульсії із застосуванням роторно-пульсаційного апарата необхідно брати до уваги характер зміни в'язкості в залежності від вмісту водної фази, кількості циклів обробки, частоти пульсацій потоку, середнього діаметра частинок дисперсної фази (води). З урахуванням характеру зміни в'язкості необхідно вносити відповідні корективи до підбору технологічного обладнання та трубопроводів, а також до технологічних режимів підготовки водомазутної емульсії до спалювання, або, навпаки, регулювати значення в'язкості стосовно наявного обладнання. *Бібл. 17, рис. 2, табл. 4.*

Ключові слова: водомазутна емульсія, в'язкість, густина, дискретно-імпульсне введення енергії, роторно-пульсаційний апарат, тепломасообмінне обладнання, енергозбереження.

Актуальність

У даний час актуальними є завдання енергозбереження та екологічної безпеки під час роботи енергетичних паливних установок. Для вирішення цих завдань особливий інтерес становлять паливні емульсії мазут-вода. Використання гомогенізованої водомазутної суміші дає можливість підвищити коефіцієнт спалювання палива, заощадити мазут та зменшити шкідливі викиди в атмосферу [1, 2].

За наявності в краплі палива дрібних включень води при нагріванні та скипанні води утворюється водяна пара, яка розриває краплю палива, збільшуючи дисперсність палива, що подається в топку, та поверхню контакту палива з повітрям. У результаті паливо більш рівномірно заповнює камеру топки, що призводить до вирівнювання температури в топці та зниження локальних максимальних температур. При цьому суттєво знижується недопал палива, з'являється можливість знизити кількість повітря, що вдувається, та зменшити пов'язані з ним тепловтрати. Частина крапель долітає до стінок та вибухає на них, що сприяє не тільки запобіганню відкладенням, але й очищенню від старих сажистих утворень.

При спалюванні водомазутних емульсій (ВМЕ)

скорочується приблизно на 90 % вихід у газових викидах NO_x , знижуються приблизно у 3–4 рази сажисті відкладення, зменшується приблизно на 70 % вихід CO [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасній практиці найбільш широкое застосування при приготуванні емульсій отримали такі типи диспергаторів: механічні, роторні, пароежекторні, ультразвукові та гідродинамічні. До найефективніших апаратів належать пристрої, що працюють на принципі використання кавітації [4, 5].

При роботі усіх диспергуючих пристроїв спостерігається виникнення турбулентності. Турбулентний тиск рідини характеризується числом Рейнольдса. При $Re > 100$ виникають осередки турбулентності, що швидко загасають при віддаленні від джерела. Встановлено, що в області виникнення турбулентності відбувається диспергування, а в інших областях — лише транспортування частинок.

При турбулентному русі може виникнути кавітація, яка інтенсифікує емульгування. Використання цього явища призвело до створення цілого класу диспергуючих пристроїв — кавітаційних

диспергаторів, що характеризуються невисокими питомими енерговитратами, високою якістю отримуваної емульсії та високою продуктивністю при невеликих габаритах установки. Кавітаційні диспергатори забезпечують більш високу дисперсність, що є одним із визначальних факторів диспергування. В області кавітаційних режимів роботи відбувається прискорення емульгування при збереженні питомих енергетичних витрат незмінними [4, 5].

Практично усі етапи технологічної підготовки ВМЕ до спалювання (транспортування трубопроводами, тривалість та способи зливних операцій при транспортуванні залізничним, водним та автомобільним транспортом, повнота відстоювання води та швидкість осадження механічних домішок при зберіганні, підігріванні палива та його прокачуванні насосами, а також ефективність роботи форсунок та якість розпилювання ними палива) істотно залежать від текучості палива, яка визначається густиною та в'язкістю [6, 7].

Більшість рідких енергетичних палив, зокрема мазут, являє собою багатофазну дисперсну структуровану систему та належить до так званих ньютонівських рідин, тобто до рідин, при деформуванні яких не дотримується закон тертя Ньютона, відбувається зміна міжмолекулярної взаємодії та зміна характеру структуроутворення з руйнуванням або утворенням агрегатів частинок та зв'язків між ними. Руйнування досить ажурної структурної сітки зв'язків між частинками при перебігу структурованої рідини виявляється у віддаленні частинок одна від одної на відстань, що перевищує адсорбційно-сольватний шар. Тому робота зовнішніх сил витрачається [8] не тільки на подолання істинної (ньютонівської) в'язкості η_n , а й на руйнування структури, що доповнює уявну або ефективну в'язкість η_0 структурної складової $\eta_{стр}$; тоді $\eta_0 = \eta_n + \eta_{стр}$.

Кардинальна зміна в'язкості мазуту та інших фізико-хімічних властивостей в гідродинамічних пристроях досягається за рахунок управління процесами трансформації гідравлічних та термодинамічних параметрів потоку, розподілу маси оброблюваного середовища в області збудження кавітаційних процесів, інтенсивного перемішування турбулентними вихорами реагентів в об'ємі потоку, що зумовлюють прискорення хімічних реакцій, здійснення фазових перетворень вуглеводнів. У процесі реакцій змінюється геометрія молекул, рівень упорядкованості надмолекулярної структури вуглеводнів. Довгі молекулярні

сполуки високов'язких вуглеводнів розщеплюються на легкі прямоланцюгові вуглеводні, що перетворюються при подальшій реакції на циклічні або розгалужені радикали.

Метою роботи є дослідження зміни реологічних показників водомазутних емульсій від використаного обладнання та технологічних параметрів їх приготування.

Матеріали та методи

Роторно-пульсаційні апарати (РПА) як емульгатори застосовуються для обробки дисперсних середовищ рідина-рідина. Характерно, що безперервним середовищем оброблюваної гетерогенної суміші завжди є рідина, що забезпечує принципову можливість реалізації в апараті широкого спектра факторів гідродинамічного впливу, які в сукупності розглядаються як базові механізми дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) [9, 10].

Щодо роботи РПА ці фактори виявляються в такий спосіб.

1. Силовий вплив з боку безперервної рідкої фази на дисперсні частинки внаслідок різкого гальмування чи прискорення потоку; це призводить до різкого перепаду тиску та виникнення руйнівного поздовжнього напруження стиснення.
2. Ініціювання явища гідродинамічного удару.
3. Гідроакустичний вплив на дисперсії внаслідок періодичного розвитку дрібномасштабних пульсацій тиску, явищ вибухового скипання та кавітації.
4. Надзвичайно високі швидкості зсуву та, як наслідок, сильні напруження зсуву, що діють на дисперсну фазу.

Крім зазначених гідродинамічних факторів, високий ступінь диспергування забезпечується також механічним впливом на частинки гетерогенного середовища, який полягає в ударних, зсувних та абразивних навантаженнях при безпосередньому контакті дисперсій з робочими елементами РПА.

Як базова модель РПА використовується конструкція апарата циліндричного типу, що складається з трьох коаксіально розміщених циліндричних елементів: двох статорів та ротора, що обертається між ними. Між ротором та статором існують дуже вузькі кільцеві зазори. На поверхнях статорів та ротора паралельно осі обертання з рівною періодичністю розташовані вузькі щілинні отвори однакової ширини, які взаємно пе-

рекриваються при обертанні ротора. Якщо всередині апарата знаходиться рідина, обертання ротора забезпечує тангенціальний рух рідини в кільцевих зазорах та, внаслідок дії відцентрових сил, її радіальне переміщення через щілинні отвори ротора та статорів.

Конструктивні характеристики базової моделі РПА [11]:

– відстань внутрішньої поверхні ротора від осі обертання $R_{r1} = 30 \cdot 10^{-3}$ м;

– відстань зовнішньої поверхні ротора від осі обертання $R_{r2} = 34 \cdot 10^{-3}$ м;

– товщина стінок ротора та статорів $l = 4 \cdot 10^{-3}$ м;

– ширина щілини на поверхні ротора та статорів $a = 4 \cdot 10^{-3}$ м;

– висота щілини ротора і статорів $h = 24 \cdot 10^{-3}$ м;

– відстань між щілинами $b = 3 \cdot 10^{-3}$ м;

– ширина зазору між ротором та статорами $\delta = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м;

– кількість щілинних отворів на поверхні ротора (статора) $n = 30$.

Режимні параметри:

– об'ємна витрата суміші, що обробляється $Q = 10^{-3}$ м³/с;

– кутова швидкість обертання ротора $\omega = 47,5$ об./с = 298 рад/с;

– тангенціальна швидкість внутрішньої поверхні ротора $v_{\phi1} = \omega R_{r1} = 8,95$ м/с;

– тангенціальна швидкість зовнішньої поверхні ротора $v_{\phi2} = \omega R_{r2} = 9,53$ м/с;

– усереднене значення тангенціальної швидкості ротора $v_{\phi} = (v_{\phi1} + v_{\phi2})/2 = 9,54$ м/с.

Об'єктами дослідження, крім описаного вище РПА, були мазут марки М-100 та вода водопровідна.

Порядок виконання досліджень

Експерименти отримання ВМЕ виконували при температурі 75 °С. Густина мазуту за даної температури становила 932,5 кг/м³, густина води за цієї температури – 974,8 кг/м³. Під час експериментів концентрація води у ВМЕ становила 5, 10, 15, 20, 25, 30 %.

ВМЕ готували наступним чином. Підігрітий до 75 °С мазут марки М-100 подавали до приймального бункера РПА, який забезпечений сорочкою для підтримки постійної температури мазуту, води та ВМЕ. Потім вмикали РПА, який одночасно є циркуляційним насосом, та мазут проходив по контуру приймальний бункер – РПА – приймальний бункер. Під час циркуляції мазуту по контуру в приймальний трубопровід РПА подавали воду в кількості від 5 до 30 %. Рециркуляцію здійснювали протягом 1–7 циклів. Обробку виконували при частоті пульсацій потоку від 1 до 6 кГц. Частота пульсацій потоку в РПА залежить від швидкості обертання ротора та кількості прорізів у робочих органах.

У залежності від умов приготування ВМЕ визначали їх реологічні властивості.

У табл. 1 наведена залежність густини ВМЕ від концентрації у ній водної фази. Під час експериментів частота пульсацій становить 4 кГц, тривалість – 5 циклів.

Встановлено, що початкова густина води при температурі 75 °С (974,8 кг/м³) більша, ніж густина мазуту М-100, на 5 %. Зі збільшенням кількості води у ВМЕ до 30 % збільшення її густини становить 2,5 %.

На наступному етапі експериментів було вивчено залежність зміни густини ВМЕ від кількості циклів обробки при частоті пульсацій потоку від 1 до 6 кГц. Склад води у ВМЕ становив 20 %. Дані експериментів наведені у табл. 2.

Зі збільшенням частоти пульсацій потоку від 1 до 6 кГц при будь-якій кількості циклів обробки густина ВМЕ збільшується. Серед досліджуваних кількостей циклів найбільше збільшення густини ВМЕ спостерігається зі збільшенням частоти пульсацій потоку від 1 до 4 кГц. Воно складає до 4 одиниць. Подальше збільшення частоти пульсацій понад 4 кГц мало впливає на густину ВМЕ, лише підвищує енерговитрати.

При досліджуваних частотах пульсацій потоку зі збільшенням кількості циклів обробки густина ВМЕ збільшується. Значне збільшення густини (приблизно одиниця за цикл) спостерігається при обробці від 1 до 5 циклів. Подальше

Таблиця 1. Залежність густини ВМЕ від концентрації у ній водної фази

Table 1. Dependence of the density of WOE on the concentration of the aqueous phase in it

Концентрація водної фази, %	0	5	10	15	20	25	30
Густина ВМЕ, кг/м ³	932,5	934,1	936,7	938,3	940,1	943,5	946,0

Таблиця 2. Залежність густини ВМЕ від кількості циклів обробки та частоти пульсацій потоку при концентрації водної фази 20 %**Table 2. Dependence of the density of WOE on the number of treatment cycles and the frequency of flow pulsations at a concentration of the aqueous phase of 20 %**

Кількість циклів	Частота пульсацій, кГц					
	1	2	3	4	5	6
1	933,1	933,6	934,0	934,8	934,9	934,9
2	933,9	934,7	935,2	935,7	935,9	936,0
3	934,6	935,8	936,6	937,2	937,3	937,4
4	935,5	936,7	937,4	938,5	938,7	938,8
5	936,9	937,6	938,7	940,1	940,3	940,4
6	937,0	938,0	939,1	940,2	940,4	940,5

Таблиця 3. Залежність структурної в'язкості ВМЕ від концентрації у ній водної фази**Table 3. Dependence of the structural viscosity of WOE on the concentration of the aqueous phase in it**

Концентрація водної фази, %	0	5	10	15	20	25	30
Структурна в'язкість, Па·с	0,160	0,178	0,208	0,253	0,310	0,347	0,368

збільшення кількості циклів обробки понад 5 практично не впливає на зміну густини ВМЕ.

Майже усі етапи підготовки ВМЕ до спалювання залежать від текучості палива, що визначається в'язкістю. Визначення структурної в'язкості ВМЕ з концентрацією води 5, 10, 15, 20, 25, 30 % виконували на ротаційному віскозиметрі «Реотест-2». Виготовання ВМЕ здійснювали в РПА при частоті пульсацій потоку 4 кГц за 5 циклів обробки.

Дані табл. 3 свідчать, що зі збільшенням кількості водної фази від 0 до 30 % в'язкість ВМЕ збільшується більш ніж удвічі. Це закономірно, оскільки в'язкість мазуту М-100 при температурі 75 °С становить 0,160 Па·с, а в'язкість води при цій же температурі дорівнює 0,378 Па·с.

При виконанні досліджень було поставлено завдання вивчити вплив частоти пульсацій потоку на структурну в'язкість ВМЕ при різному вмісті у них водної фази. Експериментальні криві наведені на рис. 1. Встановлено, що зі збільшенням частоти пульсацій потоку від 2 до 6 кГц при досліджуваних концентраціях води в'язкість підвищується. При концентрації води 5 % в'язкість збільшується незначно — на 0,02 Па·с, при концентрації 30 % — на 0,06 Па·с. Основне підвищення в'язкості спостерігається зі збільшенням частоти пульсацій потоку від 2 до 4 кГц. Підвищення частоти пульсацій від 4 до 6 кГц на зміну в'язкості мало впливає.

Наступним етапом досліджень було виконання експериментів щодо вивчення впливу кількості циклів обробки ВМЕ в РПА на структурну в'язкість в залежності від концентрації водної фази. Виготовання ВМЕ виконували в РПА з частотою пульсацій потоку 4 кГц.

З табл. 4 видно, що зі збільшенням кількості циклів обробки ВМЕ при досліджуваних концентраціях водної фази її в'язкість збільшується. Так,

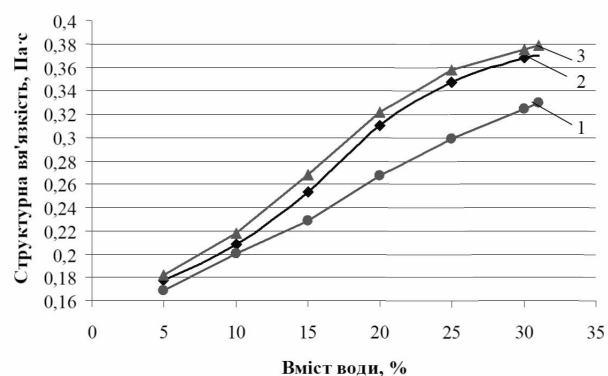


Рис. 1. Залежність структурної в'язкості ВМЕ від концентрації водної фази при обробці в РПА протягом 5 циклів з частотою пульсацій потоку: 1 — 2 кГц; 2 — 4 кГц; 3 — 6 кГц.

Figure 1. Dependence of the structural viscosity of WOE on the concentration of the aqueous phase during processing in RPA for 5 cycles with the frequency of flow pulsations: 1 — 2 kHz; 2 — 4 kHz; 3 — 6 kHz.

Таблиця 4. Залежність структурної в'язкості ВМЕ від вмісту водної фази та тривалості обробки в РПА при частоті пульсацій потоку 4 кГц

Table 4. Dependence of the structural viscosity of WOE on the content of the aqueous phase and the duration of processing in the RPA (cycles) at a flow pulsation frequency of 4 kHz

Кількість циклів обробки	Концентрація водної фази, %					
	5	10	15	20	25	30
1	0,162	0,167	0,174	0,198	0,239	0,255
2	0,165	0,175	0,860	0,225	0,258	0,281
3	0,170	0,188	0,198	0,267	0,295	0,324
4	0,175	0,199	0,242	0,296	0,329	0,357
5	0,178	0,208	0,253	0,310	0,347	0,368
6	0,179	0,211	0,257	0,316	0,350	0,372
7	0,180	0,213	0,260	0,318	0,352	0,373

при вмісті водної фази 5 % з підвищенням кількості циклів від 1 до 7 в'язкість зростає на 11 %, а при вмісті водної фази 30 % її збільшення становить 32 %. Після 5 циклів обробки ВМЕ за будь-яких концентрацій води збільшення в'язкості практично не відбувається. Збільшення кількості водної фази від 5 до 20 % призводить до підвищення в'язкості у 1,8 разів. Подальше збільшення кількості твердої фази від 20 до 30 % підвищує в'язкість ВМЕ усього в 1,1 разів.

Результати та їх обговорення

З результатів досліджень можна зробити висновки, що основне підвищення структурної в'язкості ВМЕ спостерігається зі збільшенням концентрації водної фази від 5 до 20 %, частоти пульсацій потоку — від 2 до 4 кГц, кількості циклів обробки — від 1 до 5.

На збільшення густини та в'язкості ВМЕ впливає не тільки кількість водної фази, а й технологічні параметри її отримання, а саме: умови обробки в РПА (частота пульсацій потоку, кількість циклів). Це пояснюється зменшенням розмірів крапель дисперсної фази (води) у ВМЕ.

При обробці різних середовищ в РПА одночасно відбуваються такі процеси: перемішування, диспергування, розчинення, нагрівання. Ефективність цих процесів залежить від режимів обробки та визначається для кожного середовища експериментально [12–18]. При отриманні ВМЕ в РПА відбувається диспергування крапель дисперсної фази (води) до розмірів середнього діаметра 1,0 мкм й менше. Середній діаметр крапель дисперсної фази (води) також впливатиме

на в'язкість ВМЕ. Вплив дисперсності та концентрації водної фази на в'язкість ВМЕ наведені на рис. 2. Під час експериментів ВМЕ готували в РПА протягом 5 циклів обробки з частотою пульсацій потоку 4 кГц. При цьому концентрація водної фази в досліджуваних зразках становила 10, 20, 30 %.

Зі збільшенням середнього діаметра крапель дисперсної фази (води) від 1 до 40 мкм в'язкість ВМЕ знижується. Рівень зменшення в'язкості залежить від кількості водної фази у ВМЕ. При вмісті водної фази 10 % в'язкість знижується на 16 %, при 20 % — на 32 %, при 30 % — на 34 %. Істотне зниження в'язкості (майже у 2 рази) спостерігається зі збільшенням концентрації водної

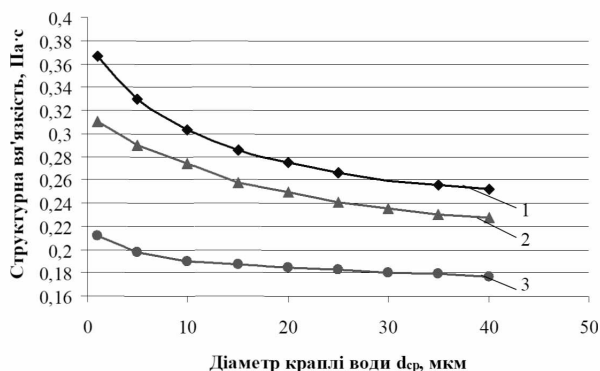


Рис. 2. Вплив дисперсності та концентрації водної фази на структурну в'язкість: 1 — 30 %; 2 — 20 %; 3 — 10 %.

Figure 2. Influence of dispersion and concentration of the aqueous phase on structural viscosity: 1 — 30 %; 2 — 20 %; 3 — 10 %.

фази від 10 до 20 %. Зі збільшенням концентрації водної фази від 20 до 30 % динаміка зниження в'язкості уповільнюється.

Висновки

Практично усі етапи технологічної підготовки ВМЕ до спалювання (транспортування трубопроводами, тривалість та способи зливних операцій при транспортуванні залізничним, водним та автомобільним транспортом, повнота відстоювання води та швидкість осадження механічних домішок при зберіганні, підігріванні палива та його прокачування насосами, а також ефективність роботи форсунок та якість розпилювання ними палива) істотно залежать від текучості палива, яка визначається густиною та в'язкістю.

Показано, що густина та в'язкість ВМЕ залежать не тільки від температури, кількісного вмісту в ній водної фази, а й від технічних засобів та технологічних параметрів її виготовлення. Для виготовлення ВМЕ використовували РПА з одним ротором та двома статорами.

Встановлено залежності зміни густини та в'язкості ВМЕ від обробки в РПА при різних частотах пульсацій потоку та кількості циклів обробки. Доведено, що в'язкість ВМЕ залежить від розміру середнього діаметра крапель дисперсної фази (води), що змінюється в залежності від параметрів обробки. Збільшення кількості циклів обробки від 1 до 5 при частоті пульсацій потоку від 1 до 4 кГц в залежності від кількості водної фази може підвищити в'язкість у 1,1–1,8 разів.

При проектуванні та експлуатації паливних господарств з урахуванням виготовлення в них ВМЕ із застосуванням РПА необхідно брати до уваги характер зміни в'язкості в залежності від вмісту водної фази, кількості циклів обробки, частоти пульсацій потоку, середнього діаметра частинок дисперсної фази (води). З урахуванням характеру зміни в'язкості необхідно вносити відповідні корективи до підбору технологічного обладнання та трубопроводів, а також до технологічних режимів підготовки ВМЕ до спалювання, або, навпаки, регулювати значення в'язкості стосовно наявного обладнання.

Список літератури

1. Кормилицын В.И., Лысков М.Г., Румынский А.А. Комплексная экосовместимая технология сжигания водомазутной эмульсии и природного газа с добавкой сбросных вод. *Теплоэнергетика*. 1996. № 9.

С. 13–17.

2. Кормилицын В.И., Лысков М.Г., Румынский А.А. Влияние добавки влаги в топку на интенсивность лучистого теплообмена. *Теплоэнергетика*. 1992. № 1. С. 41–44.

3. Кормилицын В.И., Лысков М.Г., Румынский А.А. Подготовка мазута к сжиганию для улучшения технико-экономических и экологических характеристик котельных установок. *Новости теплоснабжения*. 2000. № 4. С. 19–21.

4. Nedbailo A.Ye., Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya., Obodovych O.M., Radchenko N.L. Evaluation of the efficiency of liquid degassing technology based on the principle of hydrodynamic cavitation. *Acta Periodica Technologica*. 2023. Vol. 54. P. 237–244. DOI: 10.2298/APT2354237N.

5. Tselen B., Ivanitsky G., Obodovych O., Radchenko N., Nedbailo A., Gozhenko L. Application Method of Hydrodynamic Cavitation in the Scope of Municipal Energy to Reduce the Use of Water Resources. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. T. 25. DOI: 10.54740/ros.2023.021.

6. Макарова Е.В., Савицкий Д.П., Макаров А.С., Садовский Д.Ю. Влияние технологии стабилизации на реологические свойства и стабильность водоугольных суспензий. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2016. № 3. С. 13–18. — <https://etars-journal.org/index.php/journal/article/view/177>

7. Gurbanov G.R., Gasimzade A.V., Abbasova L.A. Study of the Effect of Physico-Chemical Properties on the Rheological Properties of High-Paraffin Oils. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. № 2. С. 35–44. — <https://etars-journal.org/index.php/journal/article/view/386>

8. Эстеркин Р.И. Промышленные котельные установки. Ленинград : Энергоатомиздат, 1985.

9. Ободович О.М., Целень Б.Я., Степанова О.Є., Недбайло А.Є., Булій Ю.В. Технологія та обладнання для одержання універсального водовугільного палива. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. № 1. С. 13–18. DOI: 10.33070/etars.1.2024.02.

10. Tselen B., Ivanytskyi G., Nedbaylo A., Radchenko N. Prospects for the use of cavitation mechanisms in order to reduce the consumption of natural water in municipal energy. *Journal of New Technologies in Environmental Science*. 2022. Vol. 6, № 2. P. 53–58. DOI: 10.53412/jntes-2022-2-1.

11. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. Киев : Наукова думка, 2001. 345 с.

12. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. I. Модель динамики одиночного парового пузырька. *Промышленная теплотехника*. 1995. Т. 17, № 5. С. 3–28.

13. Obodovych O., Sydorenko V., Tselen B., Stepanova O., Rezakova T. Application of discrete-pulse

energy input for intensification of preparation of drinking and process water by aeration oxidation. Scientific research in modern conditions of instability '2023. Monographic series «European Science». Karlsruhe, Germany. 2023. Book 24, Part 1. P. 59–67. DOI: 10.30890/2709-2313.2023-24-01-001.

14. Obodovych O., Sablii L., Sydorenko V., Tselen B. Improving the efficiency of calcium hydrocarbonate removal and reducing water hardness through discrete pulse energy input. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4, № 6. P. 28–34. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.286005.

15. Ободович О., Сидоренко В., Булій Ю., Степанова О. Застосування метода дискретно-імпульсного введення енергії в технологіях обробки крохмалєвмісної сировини. *Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions: International Science Group*. Boston: Primedia eLaunch, 2023. 461 p. DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.2.6.5.

16. Obodovych O.M., Sydorenko V.V., Tselen B.Ya., Stepanova O.Ye. Wastewater treatment using cavitation effects. In: *Innovation in modern science: Innovative technology, Computer science, Architecture, Agriculture*. Monographic series «European Science». Karlsruhe, Germany. 2023. Book 20. Part 2. P. 35–42. DOI: 10.30890/2709-2313.2023-20-02-014.

17. Obodovych O., Sabliy L., Sydorenko V., Pereiaslavtseva O., Khomenko V. Discrete-pulsed energy input in wastewater treatment technologies. *Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*. 2023. Vol. 34, № 3. P. 45–56. DOI: 10.20535/2218-930032022266601.

18. Obodovych O.M., Tselen B.Ya., Sydorenko V.V., Ivanytskyi G.K., Radchenko N.L. Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. *Acta Periodica Technologica*. 2022. Vol. 53. P. 123–130. DOI: 10.2298/APT2253123O.

Надійшла до редакції 08.02.2025

Obodovych O.M.¹, *Doctor of Technical Sciences, Professor, ORCID: 0000-0001-7213-3118*, **Tselen B.Ya.¹**, *Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0001-5213-0219*, **Stepanova O.Ye.¹**, *Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0002-7179-7251*, **Nedbailo A.Ye.¹**, *Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0002-8590-5823*, **Bulii Yu.V.^{1,2}**, *Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0002-1905-3706*

¹ *Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine*

2a, Marii Kapnist Str., 03057 Kyiv, Ukraine, e-mail: tdsittf@ukr.net

² *National University of Food Technologies*

68, Volodymyrska Str., 01601 Kyiv, Ukraine, e-mail: yvbuliy@gmail.com

Research of the rheological indicators of water-oil emulsions depending on the technical equipment and the technological parameters of their preparation

Abstract. The analysis of the dependence of the density and viscosity of the water-oil emulsion not only on the temperature, the quantitative content of the water phase in it, but also on the technical means and technological parameters of its preparation was carried out. The purpose of the work is to study the changes in the rheological parameters of water-oil emulsions depending on the equipment used and the technological parameters of their preparation. A high degree of dispersion is ensured by hydrodynamic factors and the mechanical effect on the particles of a heterogeneous environment, which consists in impact, shearing and abrasive loads in direct contact of the dispersions with the working elements of the rotor-pulsation

device. As the basic model of the rotor-pulsation device, the design of the cylindrical-type apparatus is used, consisting of three coaxially placed cylindrical elements: two stators and a rotor rotating between them. The dependences of the change in the density and viscosity of water-oil emulsion on processing in the rotor-pulsation device at different frequencies of flow pulsations and the number of processing cycles were established. It has been proven that the viscosity of water-oil emulsion depends on the size of the average diameter of the droplets of the dispersed phase (water), which varies depending on the processing parameters. An increase in the number of processing cycles from 1 to 5 at a frequency of flow pulsations from 1 to 4 kHz, depending on the amount of water phase, can increase the viscosity by 1,1–1,8 times. When designing and operating fuel plants, taking into account the preparation of water-oil emulsion in them using rotor-pulsation device, it is necessary to take into account the nature of the change in viscosity depending on the content of the aqueous phase, the number of processing cycles, the frequency of flow pulsations, and the average diameter of particles of the dispersed phase (water). Taking into account the nature of the change in viscosity, it is necessary to make appropriate adjustments to the selection of technological equipment and pipelines, as well as to the technological modes of preparing water-oil emulsion for incineration, or, on the contrary, adjust the viscosity value in relation to the existing equipment. *Bibl. 17, Fig. 2, Tab. 4.*

Keywords: water-oil emulsion, viscosity, density, discrete-pulse energy input, rotor-pulsation device, heat and mass exchange equipment, energy saving.

References

1. Kormilitsyn V.I., Lyskov M.G., Rumynskiy A.A. (1996). Kompleksnaya ekosovmestimaya tekhnologiya szhiganiya vodomazutnoy emul'sii i prirodnoy gaza s dobavkoy sbrosnykh vod. [Integrated eco-compatible technology for burning oil-water emulsion and natural gas with the addition of waste water]. *Teploenergetika*. No. 9. pp. 13–17. (Rus.)
2. Kormilitsyn V.I., Lyskov M.G., Rumynskiy A.A. (1992). Vliyaniye dobavki vlagi v topku na intensivnost' luchistogo teploobmena. [The effect of adding moisture to the furnace on the intensity of radiant heat transfer]. *Teploenergetika*. No. 1. pp. 41–44. (Rus.)
3. Kormilitsyn V.I., Lyskov M.G., Rumynskiy A.A. (2000). Podgotovka mazuta k szhiganiyu dlya uluchsheniya tekhniko-ekonomicheskikh i ekologicheskikh kharakteristik kotel'nykh ustanovok. [Preparation of fuel oil for combustion to improve the technical, economic and environmental characteristics of boiler plants]. *Novosti teplosnabzheniya*. No. 4. pp. 19–21. (Rus.)
4. Nedbailo A.Ye., Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya., Obodovych O.M., Radchenko N.L. (2023). Evaluation of the efficiency of liquid degassing technology based on the principle of hydrodynamic cavitation. *Acta Periodica Technologica*. Vol. 54. pp. 237–244. DOI: 10.2298/APT2354237N.
5. Tselen B., Ivanitsky G., Obodovych O., Radchenko N., Nedbailo A., Gozhenko L. (2023.) Application Method of Hydrodynamic Cavitation in the Scope of Municipal Energy to Reduce the Use of Water Resources. *Rochnik Ochrana Shrodoviska. [Environmental Protection Yearbook]*. Vol. 25. DOI: 10.54740/ros.2023.021.
6. Makarova E.V., Savitskiy D.P., Makarov A.S., Sadovskiy D.Yu. (2016). Vliyaniye tekhnologii stabilizatsii na reologicheskiye svoystva i stabil'nost' vodougol'nykh suspenziy. [Stabilization technologies on rheological properties and stability of coal-water suspensions]. *Energy Technologies and Resource Saving*. No. 3. pp. 13–18. — <https://etars-journal.org/index.php/journal/article/view/177> (Rus.)
7. Gurbanov G.R., Gasimzade A.V., Abbasova L.A. (2024). Study of the Effect of Physico-Chemical Properties on the Rheological Properties of High-Paraffin Oils. *Energy Technologies and Resource Saving*. No. 2. pp. 35–44. — <https://etars-journal.org/index.php/journal/article/view/386>
8. Esterkin R.I. (1985). Promyshlennyye kotel'nyye ustanovki. [Industrial boiler systems]. Leningrad : Energoatomizdat. (Rus.)
9. Obodovych O.M., Tselen B.Ya., Stepanova O.Ye., Nedbailo A.Ye., Bulii Yu.V. (2024). Tekhnologiya ta obladnannya dlya oderzhannya universal'noho vodovuhil'noho palyva. [Technology and Equipment for Obtaining of Universal Hydrocarbon Fuel]. *Energy Technologies and Resource Saving*. No. 1. pp. 24–33. DOI: 10.33070/etars.1.2024.02. (Ukr.)
10. Tselen B., Ivanytskyi G., Nedbaylo A., Radchenko N. (2022). Prospects for the use of cavitation mechanisms in order to reduce the consumption of natural water in municipal energy. *Journal of New Technologies in Environmental Science*. 6 (2). pp. 53–58. DOI: 10.53412/jntes-2022-2-1.
11. Nakorchevskiy A.I., Basok B.I. (2001). Gidrodinamika i teplomassoperenos v geterogennykh sistemakh pul'siruyushchikh potokakh. [Hydrodynamics and heat and mass transfer in heterogeneous systems and pulsating flows]. Kyiv: Naukova Dumka. 345 p. (Rus.)
12. Dolinskiy A.A., Ivanitskiy G.K. (1995). Teoreti-

cheskoye obosnovaniye printsipa diskretno-impul'snogo vvoda energii. I. Model' dinamiki odinochnogo parovogo puzyr'ka. [Theoretical substantiation of the principle of discrete-pulse input of energy. I. Model of the dynamics of a single vapor bubble]. *Promyshlennaya teplo-tekhnika. [Industrial Heating Technology]*. 17 (5). pp. 3–28. (Rus.)

13. Obodovych O., Sydorenko V., Tselen B., Stepanova O., Rezakova T. (2023). Application of discrete-pulse energy input for intensification of preparation of drinking and process water by aeration oxidation. Scientific research in modern conditions of instability '2023. Monographic series "European Science". Karlsruhe, Germany. Book 24, Part 1. pp. 59–67. DOI: 10.30890/2709-2313.2023-24-01-001.

14. Obodovych O., Sabliy L., Sydorenko V., Tselen B. (2023). Improving the efficiency of calcium hydrocarbonate removal and reducing water hardness through discrete pulse energy input. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 4 (6). pp. 28–34. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.286005.

15. Obodovych O., Sydorenko V., Buliy Yu., Stepanova O. (2023). Zastosuvannya metoda dyskretno-impul'snoho vvedennya enerhiyi v tekhnolohiyakh obrobky krokhmalevmisnoyi syrovyny. [Application of the method

of discrete-pulse energy input in technologies for processing starch-containing raw materials]. *Technical and agricultural sciences in modern realities: problems, prospects and solutions : International Science Group*. Boston: Primedia eLaunch. 461 p. DOI: 10.46299/ISG.2023.MONO.TECH.2.6.5. (Ukr.)

16. Obodovych O.M., Sydorenko V.V., Tselen B.Ya., Stepanova O.Ye. (2023). Wastewater treatment using cavitation effects. In: Innovation in modern science: Innovative technology, Computer science, Architecture, Agriculture. Monographic series "European Science". Karlsruhe, Germany. Book 20, Part 2. pp. 35–42. DOI: 10.30890/2709-2313.2023-20-02-014.

17. Obodovych O., Sabliy L., Sydorenko V., Pereiaslavitseva O., Khomenko V. (2023). Discrete-pulsed energy input in wastewater treatment technologies. *Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*. 34 (3). pp. 45–56. DOI: 10.20535/2218-930032022266601.

18. Obodovych O.M., Tselen B.Ya., Sydorenko V.V., Ivanytskyi G.K., Radchenko N.L. (2022). Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. *Acta Periodica Technologica*. Vol. 53. pp. 123–130. DOI: 10.2298/APT2253123O.

Received February 8, 2025