

УДК: 662.61; 536.46

В. Г. Шевчук¹, О. С. Черненко², О. Є. Сидоров², М. О. Іванов², А. В. Німич¹¹Військова академія (Одеса), вул. Фонтанська дор., 10, м. Одеса, 65009, Україна²Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, вул. Дворянська, 2, м. Одеса, 65082, Україна; e-mail: teplophys@onu.edu.ua

СПАЛЮВАННЯ ВОДОПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ З РІДКИХ ВІДХОДІВ ЛАКОФАРБОВОГО ВИРОБНИЦТВА ПРИ ДІЇ ВИСОКОЧАСТОТНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО РОЗРЯДУ

У статті розглянуто результати спалювання водно-паливних емульсій, які створені на основі рідких відходів лакофарбових виробництв, що переважно складаються з метилацетату. Особливістю розглянутих емульсій є великий вміст води (близько 50%). Горіння можливе при дії височастотного електричного розряду. При нагріванні крапель емульсії можливе виникнення явища мікробибуху, коли в гранулах води в краплі емульсії утворюються парові бульбашки, які при швидкому розширенні розривають початкові краплі на ще менші краплі. Це стимулює згорання мікрокрапель горючої рідини і пароутворенню води. Таким чином можливо спалювати органічні відходи «брудній воді». Зроблені оцінки газового складу при повному згоранні таких емульсій, а також витрати повітря.

Ключові слова: горіння, емульсії, рефлексна вода, рідкі органічні відходи, височастотні розряди.

Умовні позначення. ДП – дизельне паливо, ВДЕ – водно-дизельна емульсія, МАт – технічний метилацетат, МАч – метилацетат «чистий», без смол.

Останнім часом ведеться пошук альтернативних палив для економії або заміни традиційних горючих [1]. Зокрема, це направлено на зменшення деяких забруднюючих речовин під час спалювання: твердих частинок, оксиду азоту (NO_x) і монооксиду вуглецю (СО), які є шкідливими для навколишнього середовища та здоров'я людини. Емульсійне паливо отримало особливу увагу як альтернативне паливо для зменшення викидів забруднюючих речовин і підвищення ефективності згорання. Вода сприяє зниженню температури полум'я, і завдяки цьому викиди NO_x можуть бути значно зменшені.

В роботі [2] проілюстровані три режими нагрівання краплі паливної емульсії: випаровування (evaporation), пихтіння (puffing) та мікробибуху (micro-explosion). В першому режимі поверхня краплі залишається цілою і з часом розмір краплі монотонно зменшується. В режимі пихтіння в деякому місці поверхні з'являється нарост (викривлення), який через короткий проміжок часу лопається і біля краплі з'являються значно менші краплі масла. Це пов'язано з кипінням крапель води всередині краплі емульсії. При більш інтенсивному нагріванні, коли всередині краплі зароджуються багато парових бульбашок, можливе різке збільшення розміру краплі і її руйнування, що називається мікробибухом.

Відомі два основні ефекти придушення (погіршення) горіння в альтернативних видах палива з підвищеним вмістом води [3]. По-перше, виникає сильний ефект охолодження через випаровування та нагрівання води, а по-друге, концентрація кисню в реагентах дещо зменшується зі збільшенням вмісту води, якщо підтримується стехіометричне горіння. Зі збільшення вмісту водяної пари в повітрі зменшується діапазон концентрацій парів вуглеводнів для їх займання. При спалюванні емульсії в чистому повітрі кількість водяної пари збільшується після її випаровування. Автори показують, що теоретично вищі вуглеводні з вмістом води до 75 мас.% легкозаймисті в стехіометричній повітряній атмосфері.

Результати спалювання ВДЕ з вмістом води в 10 і 20% в дизельному двигуні [4] показали зменшення інтенсивності горіння (яскравості полум'я), димоутворення і часу горіння (до 15.3%) порівняно з дизельним паливом (ДП), а також скоротився період горіння. Чиста витрата палива (без урахування вмісту води в ВДЕ) збільшилася в середньому на 5.2% порівняно з витратою ДП. Хоча тепловий ефект емульсії був меншим. Температура вихлопу знизилася в середньому на 5.1% для емульсії порівняно з ДП. В середньому використання емульсії зменшило викиди NO_x на 19.6% і дим на 66.3% порівняно з ДП.

Результати тестування двигуна та візуалізації згорання, під час згорання ВДЕ розпилення палива було викликано мікрровибухом води, а тривалість згорання була зменшена завдяки покращенню згорання. Це було пов'язано зі збільшенням ефективності змішування палива з повітрям і зниженням температури горіння за рахунок прихованої теплоти випаровування води. Отже, можна було одночасно зменшити кількість NO_x і диму.

В роботі [5] наведено методику використання відпрацьованих мастил в якості високоефективного пального шляхом приготування водопаливних емульсій, що містять до 70% води, і подальшого їх спалювання в пальниках в умовах високочастотних струмкованих електричних розрядів [6].

В роботі [7] розглядається випаровування краплі рідин в повітрі кімнатної при тепловій дії високочастотного електричного розряду. Побудована фізико-математична модель розігріву краплі пояснює пульсації розміру краплі випаровуванням глобул води всередині краплі емульсії і подальшим збільшенням розмірів парових бульбашок. Втрата матеріалу емульсії при дії електричного розряду відбувається в основному за рахунок викидів під час пихтіння.

Таким чином дослідження горіння емульсій є актуальною задачею. Переважно їх дослідження відбувається експериментально.

Відходи виробництва лакофарбових виробництв, на які ми звертаємо увагу в даній роботі, – це водні шлами чи суспензії, що містять фарби, лаки та різні розчинники. Утилізація лакофарбових матеріалів, зазвичай, здійснюється п'ятьма способами: 1) рекуперация, 2) спалювання у печах, 3) поховання, 4) утилізація в плазмовому реакторі та 5) регенерація. Але залишається питання: як очистити воду, що містить відходи лакофарбових виробництв?

Метою роботи є розвиток методу утилізації водних відходів лакофарбового виробництва при факельному спалюванні під дією високочастотного струмкового розряду.

ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Досліджувався процес горіння емульсії, що складається з наступного набору відходів лакофарбового виробництва: суміш № 1 з умовною назвою «вода», суміш № 2 з умовною назвою «метилацетат», яка є відпрацьованим розчинником на базі метилацетату.

Таблиця 1

Об'єкти дослідження

Table 1

Research objects

Вода	Об'ємний вміст в суміші, %	Метилацетат	Об'ємний вміст в суміші, %
Вода	90.5		
Ксилол або толуол	0.5	Метилацетат	80 / 65
Диетилгліколь	0.03	Забруднений розчинник	20 / 35
Рефлюксна вода	0.02		
Акролеїн	9.0×10^{-5}		

Метилацетат (метилловий ефір оцтової кислоти, метилловий ефір етанової кислоти, оцтовометилловий ефір) $\text{CH}_3\text{COOCH}_3$ – органічна речовина класу складних ефірів. Широко використовується в різних сферах виробництва як ефективний розчинник при виготовленні клеїв, поліметилметакрилату, синтетичних смол, лакофарбових матеріалів, рослинних або тваринних жирів, ефірів целюлози. ін. Часто його називають «замінник ацетону». У воді розчиняється погано. Густина – 0.9 кг/дм^3 . Температура кипіння становить $56.5 \text{ }^\circ\text{C}$. При температурі кипіння метилацетат утворює азеотропну суміш із водою.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Вплив високочастотних електричних розрядів. На першому етапі дослідів метилацетат спалювався в металевій кюветі на відкритому просторі. Циліндричної форми кювету мала діаметр 9.8 см, висоту 3.5 см. Підпал «метилацетату» (об'ємом 50 мл, масою 48.28 г) у кюветі здійснювався від смужки паперу, що горить. Займання відбувалося негайно під час піднесення полум'я до поверхні МАт. Горіння було активним протягом 10 хвилин з виділенням кіптяви. Після закінчення процесу горіння на дні кювети спостерігався крихкий кристалічний залишок (40% від вихідної маси), покритий кіптявою. Відповідно, повнота згоряння становила 60%, швидкість вигорання з одиниці поверхні за одиницю часу $60 \text{ мг/(см}^2\text{с)}$.

На другому етапі дослідів здійснювався підпал «метилацетату», що знаходиться в чашці Петрі, при впливі на цю рідину стримером від високовольтного резонансного високогенераторного генератора. Вископотенційний електрод розташовувався над тиглем на відстані 3 см від дзеркала горіння МАт. Вплив стримерів від генератора якісно активує процес горіння (рис.1). Спостерігалось стійке горіння. При відключенні цього генератора горіння суміші №2 тривало, але з зага-

санням процесу. Подача високовольтного розряду відновлювала активне горіння та підтримувала його до повного вигорання цього палива.

Далі була приготовлена емульсія у співвідношенні 50 об'ємних відсотків «метилацетату і 50% «води» у спеціальній ємності і подальшого тривалого механічного перемішування штоком, що обертається з лопатками. Отримані емульговані суміші «50-на-50» і «67-на-33» (67% «води при змішуванні одного об'єму «метилацетату» і двох об'ємів води) також підпалювалися в чашці Петрі і стійко горіли під дією стримеру.

На третьому етапі дослідів горіння емульсії здійснювалося на макетній установці, що включає промисловий пальник МДП «М»-25, кварцову трубу (діаметра 110 мм, довжиною 1000 мм), з'єднана одним торцем з пальником, а іншим – з витяжним пристроєм. Для початкового пуску в пальник надходив пропан-бутан. Його підпал проводився від розряду високовольтного височастотного генератора МВВРГ з такими параметрами: напруга на електроді розрядника відносного нульового електрода $V = 96$ кВ, частота генерації $f = 138$ кГц. Режим одноелектродний, стример кистеподібної форми.

Активне горіння емульсії відбувалося трохи більше однієї хвилини при працюючому МВВРГ (рис.2). Згасання полум'я починалося з області форсунки і при підході до електродів МВВРГ (відстань близько 30 см) «схлопувалося» (гасло) з появою на виході з труби диспергованого форсункою емульсійного аерозолю. Для вимірювання температури полум'я ($T = 1030^{\circ}\text{C}$) було вимкнено МВВРГ.

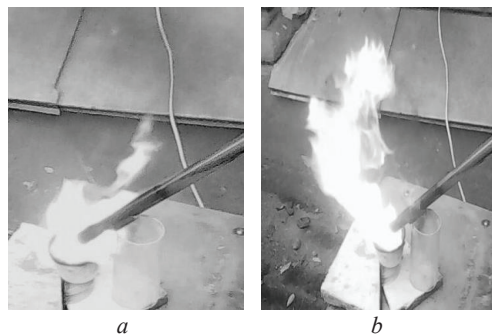


Рис.1. Горіння «метилацетату» в алундовому тиглі а) без дії і б) при дії стримерів.

Fig 1. Burning “methyl-acetate” in an alundum crucible c) without and b) with streamers.

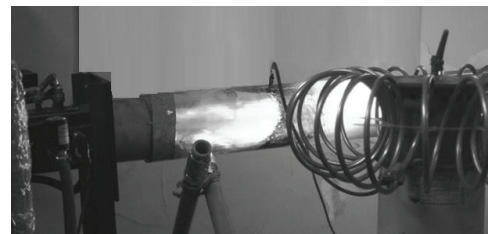


Рис.2. Розповсюдження полум'я від електроду МВВРГ

Fig. 2. Flame propagation from the electrode generator

Горіння факелу емульсії. Досліди проводилися в лютому-квітні 2020 р. в смт. Клевань Рівненської області. Використовувався пальник дизельний МДП-Д з додатковим повітряним компресором, до якого під'єднувалася форкамера (рис. 3) з електродом від генератора височастотних коливань [5]. В якості основного палива використовувалася емульсія відходів метилацетату після промивання (50%) та рефлюксної води (50%). Як пускове паливо використовувалося дизельне паливо.

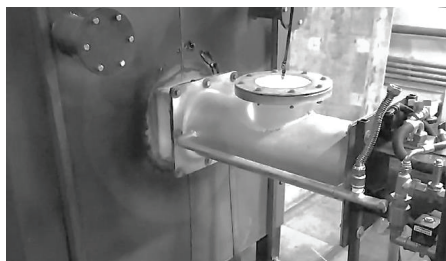


Рис. 3. Зовнішній вид форкамери в робочому режимі

Fig 3. Appearance of the forecamera in working mode

В результаті було встановлено оптимальні умови стійкого згоряння: подача палива – 26% від максимально можливого для 1 МВт пальника; подача вторинного повітря – 5%; тиск палива – 5атм; тиск первинного повітря – 3 атм.

Через 10 хвилин після початку роботи та стійкого горіння найбільше розігрівається форкамера поблизу роботи розряду і на вході в піч. Довжина смолоскипа – 2 м. За візуальними спостереженнями водяний пил проходить до кінця смолоскипа. На виході з форкамери температура 1500 °С.

Вогневий метод. Вогневий метод використовують для спалювання негорючих стічних вод. Сутність методу полягає у розпиленні стічних вод у топкові газу, що мають високу температуру (900-1000 °С). Вода при цьому повністю випаровується, органічні домішки згорають з утворенням газових продуктів, а мінеральні речовини утворюють тверді або розплавлені частинки, які потім уловлюються.

Було модернізовано комплекс для роздільної подачі метилацетату для подальшого його спалювання та рефлюксної води. Перед котлом встановили камеру з форсункою 1 (рис. 4) для розпилу під тиском води рефлюксу з витратою 25-30 кг/хв.

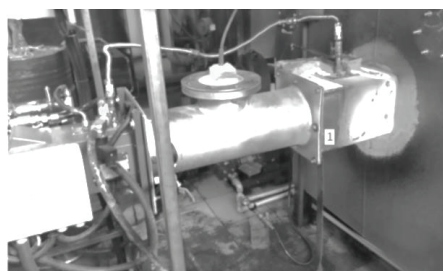


Рис. 4. Модернізація пальника дизельного МДП-Д з додатковим повітряним компресором:
1 – камера для розпилювання рефлюксної води, 2 – подача нагрітого повітря на форсунку
(від сорочки форкамери), 3 – подача рефлюксної води на форсунку.

Fig. 4. Modernization of the MDP-D diesel burner with an additional air compressor:
1 – a chamber for spraying reflux water, 2 – supply of heated air to the nozzle
(from the pre-chamber jacket), 3 – supply of reflux water to the nozzle.

Для поліпшення та збільшення дисперсності розпилу повітря для розпилу рефлюксної води попередньо нагрівається в сорочці форкамери. Для подачі рефлюксної води із основної ємності використовується насос. Для зберігання більшої кількості води є додаткові ємності.

В результаті було встановлено оптимальні умови стійкого згоряння:

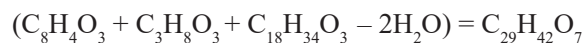
- Тиск палива – 3 атм;
- Тиск первинного повітря – 3 атм;
- Тиск повітря для розпилу води перед форкамерою – 5.5 атм;
- Тиск води перед розпилом – 4.5 атм;

В результаті спостерігається стійке згоряння основного палива та стійке розпилення рефлюксної води та подальше її вогневе очищення. Довжина смолоскипа – 3 м. Смолоскип по всій ширині форкамери. Для уловлювання димових газів у тильній стороні печі встановлені димовідсмоктувачі, які дозволяють частину їх (механічно регулюється заслінкою) відправляти на барботаж.

Проблеми, що виникали. Через деякий час форсунка для розпилу води через високу температуру виходить з ладу. Також масляні та механічні домішки у рефлюксійній воді засмічують фільтр у водяному насосі. Тому потрібна певна попередня очистка та модернізація форсунки.

Оцінка характеристик горіння емульсії метилацетат50/вода50. За основу береться паливо, яке раніше мало кодову назву «метилацетат», що містить 40% безпосередньо метилацетату, 20% води та 40% поліефірних смол. Пальним є метилацетат $C_3H_6O_2$. Вологість палива $W_p = 20\%$.

Найскладніше з невизначеним поняттям поліефірні смоли, які застосовуються в лакофарбовому виробництві. Точніше з їх орієнтовним хімічним складом. Інформація практично відсутня через різноманітність смол. Гліфталеві смоли є найбільш поширеними різновидами поліефірних (алкідних) смол і є продуктами поліконденсації гліцерину $C_3H_8O_3$ з фталевим ангідридом $C_8H_4O_3$. Гліфталеві смоли відрізняються високими електроізоляційними властивостями та гарною водостійкістю, що дозволяє широко застосовувати їх для виготовлення електроізоляційних пластиків, електроізоляційних лаків та лакофарбових матеріалів. Як модифікуючі добавки, широко застосовуються смоли на основі рицинолевої кислоти (касторового масла) $C_{18}H_{34}O_3$. В результаті приймемо для оцінок, що хімічний склад вказаної гліфталевої смоли:



Так як, смола самостійно погано горіла без розряду, а в розряді вдалося добитися згорання крапель смол, то наступні оцінки проводилася для двох випадків: паливо з негорючою (**МАч**) та горючою смолою (**МАг**). В першому випадку негорючу смолу внесемо як інертну домішку в золу. Метилацетат зі смолами (без води) має склад 50/50. Тобто елементарний склад суміші можна визначити з сумарного запису $0.5C_3H_6O_2 + 0.5C_{29}H_{42}O_7$. (табл. 2).

Таблиця 2

Склад палива «МА» с негорючою і горючою смолою в мас. % (індекс г), а також склад робочого палива (індекс р).

Table 2

The composition of «МА» fuel with non-combustible and combustible resin by mass. % (index r) and composition of working fuel (index p)

	W ^r ,	A ^r	C ^r	H ^r	S ^r	N ^r	O ^r	Всього
«МАч»	20	40	48.6	8.1	0	0	43.2	100
«МАт»	20	0	66.7	8.3	0	0	25.0	100
	W ^p ,	A ^p	C ^p	H ^p	S ^p	N ^p	O ^p	Всього
«МАч»	20	40	19.5	3.2	0	0	17.3	100
«МАт»	20	0	53.4	6.6	0	0	20.0	100

Використаємо технічні формули, наприклад з [9]. Для подальших розрахунків потрібні значення складових робочої маси палива:

$$C^p = C^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100}, \quad H^p = H^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100}, \quad O^p = O^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100}$$

Тут A^p – масова частка частки золи, W^p – масова частка вологи в паливі.

Зазвичай для повного спалювання необхідно подавати трохи більше повітря, ніж для стехіометричного спалювання. Теоретично необхідна витрата повітря для згорання палива з урахуванням коефіцієнт надлишку кисню $\alpha = 1.2$:

$$L_\alpha = \alpha \cdot (0.0889C^p + 0.265H^p - 0.0333(O^p - S^p))$$

для «МАч» складає $L_\alpha = 2.40$ м³/кг палива, для «МАт» 7.00 м³/кг палива.

Об'єми окремих складових продуктів горіння рідкого палива (табл. 3) підраховуються по формулам (м³/кг палива):

$$V_{CO_2} = 0.01855 \cdot C^p, \quad V_{N_2} = 0.79 \cdot L_\alpha + 0.008 \cdot N^p, \quad V_{O_2} = 0.21(\alpha - 1) \cdot L_\alpha,$$

$$V_{H_2O} = 0.112 \cdot H^p + 0.0124 \cdot (W^p + 100 \cdot W_{нар}) + 0.016 \cdot \phi \cdot L_\alpha.$$

Тут W_{нар} – кількість пару, що з'являються в результаті випаровування води з емульсії в кг/кг палива. Для емульсії МА50В50 приймається W_{нар} = 50/50. ϕ – вологість первинного повітря. Так як її поки не вимірюємо, то приймемо $\phi = 0$.

Сумарний об'єм продуктів горіння V_0 визначається додаванням

$$V_0 = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}.$$

Звертаємо увагу, що даний розрахунок, зазвичай проводиться при нормальних умовах (температурі 273 К або 0 °С і тиску 1 атм). При підвищеній температурі $V_T = V_0 \frac{T}{T_0}$. Для оцінки об'єму продуктів згорання візьмемо температуру 150 °С (423 К). T_0

Таблиця 3

Склад продуктів згорання (м³/кг палива) (або на 2 кг емульсії з W = 50 %)

Table 3

Composition of combustion products (m³/kg fuel) (or 2 kg emulsion, W = 50%)

	V_{CO_2}	V_{N_2}	V_{O_2}	V_{H_2O}	V_0	L_α	V_{150}
«МАч» (1 кг МАч + 50/50 кг води) / хв	0.36	1.90	0.10	1.85	4.22	2.4	6.5
«МАт» (1 кг МА + 50/50 кг води) / хв	0.99	5.53	0.29	2.32	9.05	7.0	14.0

Теплота згорання рідкого «метилацетату»:

$$Q_n^p = 339 \cdot C^r + 1030 \cdot H^r - 108.9(O^p - S^p) - 23W^p$$

дорівнює для МАч 19650 кДж/кг МАч, для МАт – 28588 кДж/кг МАт.

Якщо перерахуємо на емульсію, то для МА50В50 маємо

для МАч $Q_{\text{емуль}}^p = 0.5 \cdot 19650 - 0.5 \cdot 2300 = 8675$ кДж/кг емульсії;

для МАт $Q_{\text{емуль}}^p = 0.5 \cdot 28588 - 0.5 \cdot 2300 = 13144$ кДж/кг емульсії.

Тут другий доданок враховує витрати при випаровуванні вологи з емульсії.

ВИСНОВКИ

Досліди щодо дослідження процесів горіння метилацетату з розчиненими в ньому відходами лакофарбового виробництва дозволили визначити: якісну картину активації процесу горіння МАт під дією розрядів від високовольтного резонансного генератора.

Досліди з підпалом «водно»-емульсійного середовища на основі «метилацетату» із співвідношенням компонентів 50% «води» та 50% «метилацетату» за допомогою високовольтного високочастотного розряду показали можливість горіння даної емульсії. На жаль, технічні недоліки системи підігріву, подачі та розпилу емульсії призводять до залипання діафрагми форсунки емульсією, що остигає.

Облік згорання поліефірних смол свідчить про те, що обсяг продуктів згорання обраних емульсій зростає майже в 1.5-2 рази більше відносно обсягу первинного повітря. Основний обсяг продуктів згорання займає азот первинного повітря (близько 50%) та водяна пара (близько 40%).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Pei X., Guida P., AlAhmadi K.M., Al Ghamdi I.A., Saxena S., Roberts W.L.* Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a swirling flame // *Fuel Process. Technol.* – 2021. – Vol. 216. – P. 106800 <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106800>
2. *Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A.* Micro-Explosion Phenomenon: Conditions and Benefits // *Energies.* – 2022. – Vol. 15. – P. 7670. <https://doi.org/10.3390/en15207670>
3. *Gabera C., Wachter P., Demuth M., Hochenaue C.* Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen // *Fuel.* – 2020. – Vol. 282. – P. 118692 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118692>

4. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium // *Acta Astronautica*. – 2019. – Vol. 160. – P. 258–269 <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.04.048>
5. Шевчук В.Г., Німич А.В., Черненко О.С., Сидоров О.Є. Використання водних емульсій відпрацьованих моторних мастил в якості високоефективного горючого // *Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса)*. – 2023. – № 2(20). – С. 139-148 <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.20.139-148>
6. Стариков М.А., Хлебникова М.Е., Буланін Ф.К., Сидоров А.Е., Полетаєв Н.И., Шевчук В.Г. Горение диспергированного жидкого и твердого топлива в присутствии электрических разрядов // *Фізика аеродисперсних систем*. – 2018. – № 55. – С. 59-70
7. Черненко О.С., Тимофієнко К.В., Іванов М.О. Випаровування крапель горючих рідин в електричному розряді // *Фізика аеродисперсних систем*. – 2023. – № 61. – С. 212-226.
8. Тарахно О.В., Трегубов Д.Г., Жернольов К.В., Шепелєва А.І., Коврегін В.В. Теорія розвитку та припинення горіння. Практикум. Частина I. – Х.: НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2010. – С. 3-9.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2024

V. G. Shevchuk¹, O. S. Chernenko², O. E. Sidorov², M. O. Ivanov², A. V. Nimych¹

¹Military Academy (Odesa), 10 Fontanska Rd, Odesa, 65009, Ukraine

²Odesa I. I. Mechnikov National University, 2 Dvorianska St, Odesa, 65082, Ukraine;

e-mail: tephys@onu.edu.ua

BURNING OF WATER-FUEL EMULSION FROM PAINT INDUSTRY WASTE

The article reviewed the results of water-fuel emulsions combustion, which are created on the basis of paint industry waste. They are created by mixing a contaminated solvent (with 65-80% methyl acetate or acetate) and reflux water. A feature of the considered emulsions is a high water part (about 50%). Combustion is possible under the action of a high-frequency electric discharge. Emulsion drops are heated and a micro-explosion phenomenon may occur, when steam bubbles form in the water granules in the emulsion drop. It upon rapid expansion, break the initial drops into even smaller drops. This stimulates the microdroplets combustion of flammable liquid and the water vapor formation. In this way, it is possible to burn organic waste with “dirty water”.

Experiments were conducted in several stages. At the first stage, the combustion of the original fuel (waste) was studied in a Petri dish, where the effect of high-frequency discharges on increasing the burning rate was shown. The emulsion was created by mechanical mixing of liquid fuel and water. Active emulsion combustion in the industrial burner was observed only when the high-frequency discharge generator was operating. The disadvantage is the need for preliminary mechanical cleaning of waste. The nozzle and filters in the pumps could fail. An alternative is the separate supply and spraying of fuel and water. Thus fire method of cleaning and processing non-flammable waste water has been implemented. Steady combustion of the main fuel and steady spraying of reflux water and its subsequent fire cleaning are observed. The length of the torch is 3 m.

Estimates of gas composition during complete combustion of such emulsions, as well as air flow, were made. Taking into account the combustion of polyester resins, which contains paint industry waste, indicates that the volume of combustion emulsions products increases almost 1.5-2 times more than the volume of primary air. The main amount of combustion products is nitrogen of primary air (about 50%) and water vapor (about 40%).

Key words: combustion, emulsions, reflex water, liquid organic waste, high-frequency discharges.

REFERENCES

1. Pei X., Guida P., AlAhmadi K.M., Al Ghamdi I. A., Saxena S., Roberts W.L. *Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a swirling flame*. Fuel Process. Technol., 2021, vol. 216, pp. 106800 <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106800>
2. Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. *Micro-Explosion Phenomenon: Conditions and Benefits*. Energies, 2022, vol. 15, pp. 7670. <https://doi.org/10.3390/en15207670>
3. Gabera C., Wachter P., Demuth M., Hochenau C. *Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen*. Fuel, 2020, vol. 282, pp. 118692 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118692>
4. Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. *Comparison of the characteristics of micro-explosion and ignition of two-fluid water-based droplets, emulsions and suspensions, moving in the high-temperature oxidizer medium*. Acta Astronautica, 2019, vol. 160, pp. 258–269 <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.04.048>
5. Shevchuk V.G., Nimych A.V., Chernenko O.S., Sidorov O.E. *The use of aqueous emulsions of spent motor oils as a highly efficient fuel*. Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa), 2023, vol. 2, no 20, pp. 139-148 <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.20.139-148> (in Ukrainian)
6. Starikov M.A., Khlebnikova M.E., Bulanin F.K., Sidorov A.E., Poletaev N.I., Shevchuk V.G. *Combustion of dispersed liquid and solid fuel in the presence of electrical discharges*. Physics of aerodisperse systems, 2018, no 55, pp. 59-70. (in Russian)
7. Chernenko O.S., Timofienko K.V., Ivanov M.O. *Evaporation of droplets of flammable liquids in an electric discharge*. Physics of Aerodisperse Systems, 2023, no 61, pp. 212-226. (in Ukrainian)
8. Tarakhno O.V., Tregubov D.G., Zhernoklev K.V., Shepeleva A.I., Kovregina V.V. *Theory of development and cessation of combustion*. Practicum Part I. Kharkiv, 2010, pp. 3-9. (in Ukrainian)