

## ВПЛИВ СКЛАДУ ТА ДИСПЕРСНОСТІ ВОДО-ЕМУЛЬСІЙНИХ ПАЛИВ НА ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ГОРІННЯ

*В. О. Мельник*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. +380979089840,  
e-mail: victor\_11@ukr.net*

*Розвиток економіки держави, а разом і промислових підприємств призводить до підвищення попиту на всі види енергоносіїв. Це характеризується постійним пошуком та дослідженням нових прогресивних видів енергії та джерел сировини, особливо для ТЕС, ТЕЦ і комунально-побутового сектору, які для роботи використовують рідке паливо – зазвичай мазут. Для таких підприємств актуальним є стабільне і вчасне забезпечення паливною сировиною, вдосконалення методів її спалювання, здешевлення отримання енергії тощо. Існуючі технології спалювання важких обводнених вуглеводнів є неякісними і, відповідно, є доцільним розроблення нових або оптимізація існуючих. Це дозволить знизити енерговитрати на технологічні підготовчі операції із обезводнення палив, зменшити кількість забруднених нафтопродуктами водою, знизити до мінімуму їх шкідливий вплив на навколишнє середовище. Одним із перспективних напрямків вирішення спалювання важких обводнених вуглеводнів є застосування водоемульсійних палив (ВЕП). Стійкість та ефективність горіння такої паливної емульсії значно буде залежати від наявної кількості та дисперсності води у ВЕП. Сьогодні такі технології емульгування та параметри ВЕП ще недостатньо вивчені, тому мають велике наукове та практичне значення. Проведений аналіз теорії, які описують вплив дисперсності та кількості води у емульсії на показники горіння, показує, що вони є суперечливими. Це може бути наслідком різноманітних фізичних характеристик палива: складу, в'язкості, температури та ін., що і спричинило отримання різних результатів. Оскільки дослідження різними авторами проводились за різних умов, режимів, обладнання та з різними паливними емульсіями, неможливо вказати оптимальне значення дисперсності та кількості води. Очевидно, що у кожному випадку буде різна оптимальна «поверхня» співвідношень розмірів крапель води і її кількості у ВЕП. Майбутні експериментальні та теоретичні дослідження спалювання ВЕП необхідно зосередити на діапазоні вмісту води 3-30% та дисперсністю 1-35 мкм.*

**Ключові слова:** енергія, мазут, емульсія, паливо, сировина, спалювання, процес горіння, обводненість.

*Развитие экономики государства, а вместе и промышленных предприятий приводит к повышению спроса на все виды энергоносителей. Это характеризуется постоянным поиском и исследованием новых прогрессивных видов энергии и источников сырья, особенно для ТЭС, ТЭЦ и коммунально-бытового сектора, использующих для работы жидкое топливо - обычно мазут. Для таких предприятий актуально стабильное и своевременное обеспечение топливной сырьем, совершенствование методов ее сжигания, удешевление получения энергии и тому подобное. Существующие технологии сжигания тяжелых обводненных углеводородов являются некачественными и, соответственно, целесообразно проводить разработку новых или оптимизацию уже существующих. Это позволит снизить энергозатраты на технологические подготовительные операции по обезвоживанию топлив, уменьшит количество загрязненных нефтепродуктами водоемов, снизит до минимума их вредное воздействие на окружающую среду. Одним из перспективных направлений решения сжигания тяжелых обводненных углеводородов является применение водоемульсионных топлив (ВЭТ). Устойчивость и эффективность горения такой топливной эмульсии значительно будет зависеть от имеющегося количества и дисперсности воды. Сегодня такие технологии эмульгирования и параметры ВЭТ еще недостаточно изучены и поэтому имеют большое научное и практическое значение. Проведенный анализ теории, описывающие влияние дисперсности и количества воды в эмульсии на показатели горения показывает, что они противоречивы. Это может быть следствием различных физических характеристик топлива: состав, вязкости, температуры и т.д., что и повлекло получения различных результатов. Поскольку исследования различными авторами проводились при различных условиях, режимах, оборудовании и с различными топливными эмульсиями, невозможно указать оптимальное значение дисперсности и количества воды. Очевидно, что в каждом случае будет разная оптимальная «поверхность» соотношений размеров капель воды и ее количества в ВЭТ. Будущие экспериментальные и теоретические исследования сжигания ВЭТ необходимо сосредоточить на диапазоне содержания воды 3-30% с дисперсностью 1-35 мкм.*

**Ключевые слова:** энергия, мазут, эмульсия, топливо, сырье, сжигание, процесс горения, обводненность.

*The development of the economy of the state, as well as industrial enterprises, leads to an increase in demand for all types of energy carriers. This is characterized by the constant search and exploration of new progressive types of energy and sources of raw materials, especially for thermal power plant TPPs, CHPs and utilities, which use liquid fuel - usually fuel oil - to operate. For such enterprises, stable and timely supply of fuel raw materials, improvement of methods of its combustion, reduction in the cost of obtaining energy, etc. are relevant. Existing heavy hydrocarbon combustion technologies are of poor quality and it is therefore advisable to develop new ones or to optimize existing ones. This will reduce energy costs for technological preparatory operations for the dewatering of fuels, reduce the amount of polluted water reservoirs, and minimize their harmful effects on the environment. One of the most promising areas for combustion of heavy water hydrocarbons is the use of water emulsion fuels (WEF). The stability and efficiency of combustion of such a fuel emulsion will greatly depend on the amount and dispersion of water in the WEF. Today, such emulsification technologies and WEF parameters are not yet well understood and are therefore of great scientific and practical importance. The analysis of the theories describing the effect of dispersion and the amount of water in the emulsion on the combustion indices shows that they are contradictory. This can be due to the different physical characteristics of the fuel: composition, viscosity, temperature, etc., which has led to different results. Since studies by different authors were conducted under different conditions, modes, equipment and with different fuel emulsions, it is not possible to indicate the optimum value of dispersion and amount of water. Obviously, in each case there will be a different optimal "surface" of the ratio of the size of the droplets of water and its number in the WEF. Future experimental and theoretical studies on the combustion of WEF should focus on the water content range of 3-30% and the dispersion of 1-35 microns.*

Keywords: energy, fuel oil, emulsion, fuel, raw materials, burning, combustion process, watercut.

### Вступ

Енергія – один з найважливіших продуктів для суспільства, що визначає розвиток будь-якої держави. Це також стосується і України. Розвиток економіки та потужностей промислових підприємств призводить до підвищення попиту на всі види енергоносіїв. Це характеризується постійним пошуком та дослідженням нових прогресивних видів енергії та джерел сировини. Особливо це стосується теплових електростанцій (ТЕС), теплоелектроцентралей (ТЕЦ) і комунально-побутового сектору, які для роботи використовують рідке паливо – зазвичай мазут. Для таких підприємств актуальним є стабільне і вчасне забезпечення паливною сировиною, вдосконалення методів її спалювання, здешевлення отримання енергії тощо.

Аналізуючи статистичні дані Державної служби статистики України [1] щодо використання палива (рис. 1), складно оцінити потребу у мазуті. А вже однією із перших причин зменшення використання мазуту є початок дії технічного регламенту (з 1 січня 2017 р.), який забороняє виробництво і використання котельних палив (мазутів) із вмістом сірки більше 1 відсотку (масового) [2]. З 1 січня 2020 р. – допустимий вміст сірки у мазуті не повинен перевищувати 0,5 % [3].

Проте відомі випадки, коли з метою запобігання виникненню надзвичайної ситуації на об'єктах Міненергосув'язу та сталого енергозабезпечення споживачів міста Києва (в тому числі об'єктів особливої державної ваги та соціального значення), «Київенерго» (ТЕЦ-5 та ТЕЦ-6) тимчасово переходили на спалювання наявного мазуту з вмістом сірки 2,5% з

02.03.2018 року по 06.03.2018 включно [4]. Такі заходи зменшили добові витрати газу на ТЕЦ-5 та ТЕЦ-6 з 7 млн м<sup>3</sup> до 4,3 млн м<sup>3</sup>. Економія газу при цьому становила 10,9 млн м<sup>3</sup> протягом чотирьох діб. Звідси зрозуміло, що мазут був, є і залишається резервним паливом на більшості ТЕС і ТЕЦ.

З однієї сторони, відчувається гостра нестача мазуту, з іншої, на території України знаходиться багато свердловин з малим дебітом нафти, яку не вигідно реалізовувати на нафтопереробних заводах, проте її достатньо для забезпечення сировиною котельних підприємств чи невеликих ТЕС і ТЕЦ. В Україні є проблема із відпрацьованими мастилами, спалювання яких можна розглядати як один із методів утилізації [5].

Процес якісного горіння паливної сировини ускладнюється наявністю надмірної кількості у ній води. Наприклад, у нафтопереробній промисловості, згідно з [6] вологість мазуту не повинна перевищувати 0,3–1,0%, а при його тривалому зберіганні у резервуарах може досягати 20%. Тому при підготовці паливної сировини до спалювання значну увагу приділяють процесу її зневоднення, який ускладнюється наявністю у складі мазуту поверхнево-активних речовин (ПАР) – асфальтенів, які є природними емульгаторами [7].

Проблемою, що виникає при спалюванні рідкого палива, основним хімічним складом якого є важкі вуглеводні, – ускладнене горіння. При горінні важких вуглеводнів у атмосферу у великій кількості виділяються шкідливі продукти згоряння – CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, що негативно впливає на екосистему.

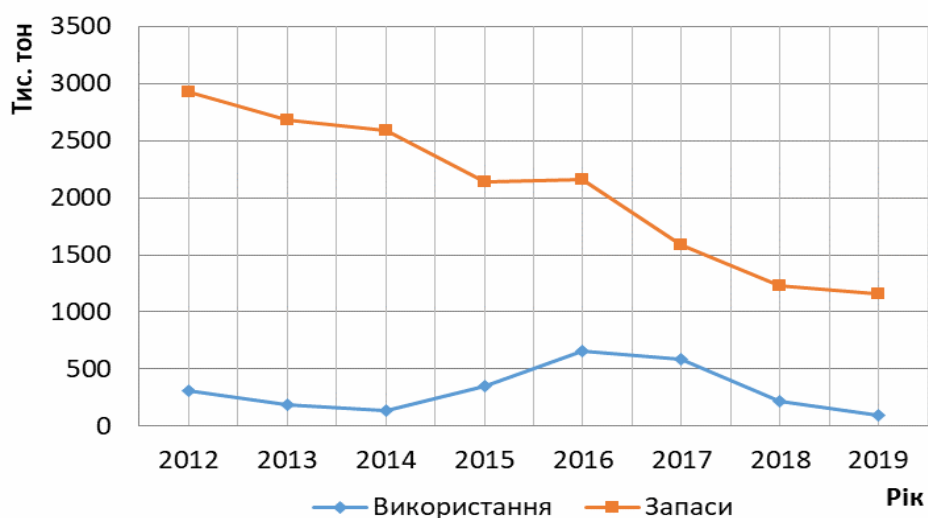


Рисунок 1 – Динаміка використання та запасів мазуту протягом 2012-2019 р.

Описані проблеми є різноманітними, але їх можна усунути, вирішивши одну головну проблему - неякісну технологію спалювання важких обводнених вуглеводнів. Тому доцільно розробити нові або оптимізувати вже існуючі технології спалювання обводнених вуглеводневих палив, що дозволить знизити енерговитрати на технологічні підготовчі операції із обезводнення палив, зменшити кількість забруднених нафтопродуктами водойм, знизити до мінімуму їх шкідливий вплив на навколишнє середовище [8].

#### Аналіз досліджень і публікацій

Одним із перспективних напрямків вирішення спалювання важких обводнених вуглеводнів є застосування водоемульсійних палив (ВЕП), що містять нафту [5], мастила, оливи тощо.

ВЕП – це система, що складається з двох рідких фаз, одна з яких диспергована у вигляді крапель в іншу [9]. Рідина, яка роздроблена на краплі, називається дисперсною фазою, а рідина, у якій знаходяться ці краплі, називається дисперсійним середовищем. Дві рідини, наприклад, мастило (М) та вода (В), можуть утворювати два види емульсії: мастило у воді (М/В) – пряму емульсію, і вода в мастилі (В/М) – зворотну [9]. Найбільший практичне значення мають зворотні емульсії. Тому, в подальшому під терміном «емульсія» чи «паливна емульсія» (ПЕ) матиметься на увазі – зворотна емульсія.

Праці, у яких розглядається теорія і практика використання ВЕП, виникають в періоди економічних і енергетичних труднощів країни або через погіршення екологічного стану навколишнього середовища. Сьогодні ці причини

поєдналися в часі. З одного боку, постійне стрімке підвищення цін на енергоносії змушує інженерів шукати нові види палив, з іншого боку, – виробнича сфера України потребує підвищення енергоефективності виробництва. Аналіз публікацій, які стосуються застосування ВЕП з нафтових відходів, показує, що економічна ефективність їх застосування оцінюється лише орієнтовно і не містить оцінки попередженого екологічного збитку.

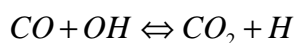
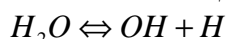
Технології емульгування паливної сировини та спалювання їх емульсії відомі досить давно. Приготуванням та горінням ВЕП присвячені багато робіт як вітчизняних, так і закордонних науковців. Перші результати були отримані ще у першій половині минулого століття [7]. При цьому вперше були встановлені особливості поведінки окремих крапель емульсії під час нагрівання, які зводяться до трьох типів:

- 1) відсутність видимого впливу води при нагріванні і згорянні крапель емульсії легкокиплячих палив;
- 2) істотне збільшення розмірів крапель емульсії в'язких палив з подальшим різким їх зменшенням і згорянням;
- 3) «мікробибухове» руйнування крапель емульсії в'язких палив.

Явище «мікробибуху» пояснюється так. Температура кипіння краплі води, яка міститься всередині палива, менша за температуру загоряння палива. Під дією температури (а точніше під дією теплоти, отриманої від зони горіння) крапля води збільшується у об'ємі до критичного значення сил поверхневого натягу води. Далі, після перевищення сили поверхневого натягу води, сили розширення розривають

краплю на дрібніші частини. Цей процес характеризується «мікробухом». Він настільки потужний, що розриває шар палива, яке оточувало краплю води. Завдяки цьому здійснюється не лише диспергування води, а і додаткове подрібнення (після їх розпилення з форсунки) та рівномірне розміщення крапель палива у зоні горіння. В результаті такого «мікробуху» утворюються настільки дрібні краплі, що все паливо випаровується і горіння завершується без стадії горіння коксового залишку [10].

Також вміст водяної пари інтенсифікує реакцію горіння [11] та виконує функцію каталізатора. За рахунок наявності додаткової кількості гідроксильного радикала ( $OH$ ) пришвидшується реакція окислення оксиду вуглецю:



Таким чином, з метою підвищення ефективності роботи пристроїв для спалювання ВЕП та якості її горіння пропонується високовартісну стадію зневоднення палива замінити на стадію емульгування – рівномірного розподілу води у об'ємі палива (у вигляді дрібних крапель) [5, 10]. При цьому можна усунути її розшарування не лише з використанням дорогих ПАР, а із застосуванням технологій, які забезпечують стійкість такого палива за рахунок утворення дрібнодисперсної емульсії. Зрозуміло, що стійкість та ефективність горіння такої ПЕ значно буде залежати від наявності кількості та дисперсності води у ВЕП. Сьогодні такі технології емульгування та параметри ВЕП ще недостатньо вивчені і тому мають велике наукове та практичне значення.

#### Мета роботи та обґрунтування необхідності її виконання

Для підвищення якості горіння ВЕП необхідно визначити:

- оптимальну область зміни дисперсності води в паливі;
- межі вмісту води у паливі;
- взаємозв'язок між дисперсністю та вмістом води.

#### Викладення основного матеріалу

У праці [7] автор встановив, що при використанні вологого рідкого палива знижується його теплопродуктивність, збільшується вміст водяної пари у продуктах згорання, внаслідок чого зростають втрати із вихідними газами та знижується ККД установок. Також пришвидшується корозія деталей установок для спалювання. Вологість рідкого палива до 20% не

знижує показники топкового процесу при дотриманні усіх інших умов його організації. При застосуванні обводненого мазуту вологістю 15-20% та вище необхідно організувати топковий процес так, щоб виключити труднощі, які зазвичай виникають внаслідок наявності води у в'язкому рідкому паливі.

Згідно [10] максимальна обводненість мазуту, що спалювався, складала 63,8%. Проте використання такого високообводненого мазуту було неефективним. Автор [10] стверджує, що навіть при будь-якому форсуванні топки, збільшення вмісту води у паливі більше 25-30% недоцільне, оскільки відбувається значне зниження теоретичної температури за рахунок розбавлення продуктів згорання водяною парю. Дослідник підкреслює, що вміст у паливі 25-30% води пропорційний збільшенню концентрації водяної пари у продуктах згорання "сухого" мазуту лише на 2-3% (з врахуванням парціальних тисків). Тому 25-30% води у мазуті повинна вважатися граничною. При більш високій обводненості ефект каталітичного впливу води буде як би повністю витрачено внаслідок зниження температури у зоні горіння. При цьому позитивна дія води (водяні пари) компенсується і навіть перебивається її негативним впливом, як інертного розчинника горючої суміші.

Дослідження А. К. Абрамова [12] і Л. С. Рапиовца [13] присвячені факельному горінню ВЕП. Факел спостерігався візуально і вимірювалися його температури у кількох точках за допомогою термопар. Були експериментально виявлені залежності полів температури факела від фракційного складу палива. Зокрема, при вмісті води у емульсії у кількості 5-10 % спостерігається деяке зміщення ядра горіння у напрямку до форсунки; при концентрації води 15-20 % розподіл теплових потоків має вигляд яскраво виражених концентричних кіл. Також отримано залежності для забезпечення оптимального спалювання ВЕП у топці котельної установки. Згідно з А. К. Абрамовим, при роботі котельні на ВЕП, факел стає коротшим і дещо розширюється. Встановлено, що відношення поверхонь мазутного і емульсійного (при вмісті води 10-15 %) факелів рівне 1,15-1,35. Це свідчить про те, що температурний рівень у останнього є вищим. При спалюванні ВЕП максимальні значення температури на 35-45 °С вищі максимальних температур мазутного факела. У той же час, експериментальні дані, отримані Л. С. Рапиовец, дають протилежний результат – при спалюванні мазуту марки М40 температура горіння складає 1820 °С, а при

спалюванні емульсії з вмістом 16 % (вагових) води, температура при повному згорянні становить 1790°C. Інформація щодо впливу величини дисперсності водяної фази ВЕП на процеси горіння авторами не наводиться.

Про такий неоднозначний зміст теорій, які описують вплив води або водяної пари на процеси горіння палива, також описується в роботі [11]. Сигал І. Я. [11] розглядає полярність думок науковців щодо позитивного впливу вологи у паливі. Частина дослідників [14, 15] стверджують, що навіть значна кількість водяної пари суттєво не впливає на вихід оксидів азоту. Інші [16, 17] навпаки, вказують на ефективність цього методу. Аналізуючи ряд інших джерел, автор підсумовує, що за рахунок використання ВЕП вміст  $\text{NO}_x$  в димових газах знижується на 20-30 %, а вміст сажі також різко знижується. Проте, при додаванні до мазуту 10 % води ККД котла знижується на 0,7 %.

Адамов В. А. [18] стверджує, що для якісного подрібнення палива інколи в нього додають воду (переважно не більше 10%). При випаровуванні вологи бульбашки пари розриваються, викликаючи вторинне його подрібнення.

Відповідно до даних [19] оптимальна кількість води у емульсії складають 6-14 %, а дисперсності – від 1-го до 35-45 мкм.

Науковці [20, 21], досліджуючи залежність впливу розміру дисперсної фази (розміри крапель води) на показники горіння, дійшли до висновку, що оптимальна дисперсність ВЕП з вмістом води 12 % рівна 10 мкм. При спалюванні ПЕ з такими волого-дисперсійними характеристиками, концентрації сажистих частинок і бенз(а)пірену у продуктах згорання будуть найменшими (рис. 2).

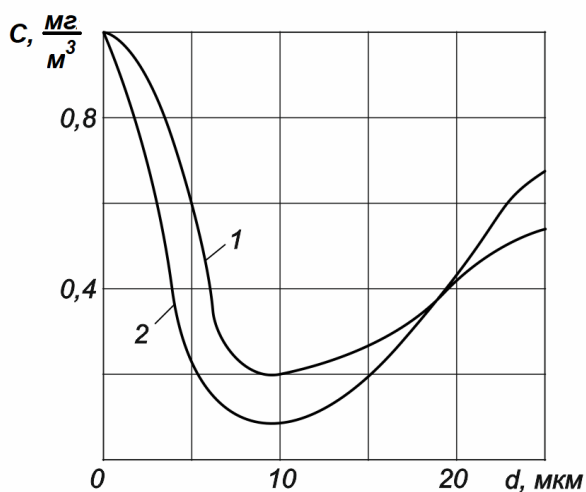


Рисунок 2 – Залежність концентрації частинок сажі  $C_{сч}$  (1) і бенз(а)пірену  $C_{бп}$  (2) в продуктах згорання ВЕП вологістю 12 % від розмірів дисперсної фази  $d$

У роботах [22] зазначається, що при спалюванні ВЕП із вологістю 20% можна досягти зниження емісії шкідливих речовин у атмосферу: оксиду вуглецю  $\text{CO}$  і сажі – у 2 рази, окислів азоту  $\text{NO}_x$  – на 30-50 %. Температура горіння ВЕП порівняно із температурою горіння чистого мазуту марки М40 знизилась із 1820 до 1790 °С. При використанні такої ВЕП ККД котла підвищився на 0,5-1,0 % , а питома витрати умовного палива на отримання одиниці виробленої теплової енергії зменшилась на 0,4-0,8 кг/Гкал.

Згідно з результатами досліджень [23] оптимальна кількість води в емульсії становить 10-20 %. Найбільша економія палива 3-5 % забезпечується при наявності 12-17 % води в паливі. Деяке підвищення витрати палива на випаровування (до 1,3 % при 20 % води) компенсується ростом ККД установки (до 5 %). Це і забезпечує загальну економію палива. При оптимальному вмісті води автори [8] відзначили також зниження втрат тепла з газами, що відходять (до 40 %), а також зменшення середньої температури газів в камері згорання на 2,0-3,5 %, і до 30-35 % за камерою згорання. Вміст 10-15% води у мазуті дозволяє знизити емісію  $\text{NO}_x$  на 30-35 % у промислових печах. Відбувається більш глибоке вигорання палива, зменшуються зольні відкладення у газовому тракті та, як наслідок, підвищується ефективність роботи промислових печей. У проведених експериментах [23] дисперсність води становила 0,8–3 мм. Раціонально організований процес спалювання ВЕП з вмістом води 10-15 % і присадками до 1,5 % є доцільний з екологічної точки зору, оскільки запобігає забрудненню оточуючого середовища [19, 23] .

Науковці Акимов А. В. і Агеев М. С. [24] акцентують увагу на правильному дозуванні вологи у паливі. Оскільки при понижений її кількості ефект нейтралізації є неповним, а при надлишковій концентрації  $\text{NO}$  і  $\text{CO}$  залишаються практично постійним, як і до подачі вологи. Автори вважають, що оптимальною вологістю ПЕ є 12 %. Щодо дисперсності, то при великих її розмірах відбувається зниження температури факела внаслідок баластування парами води зони активного горіння. Також оптимальний розмір дисперсної фази буде залежати від дисперсності розпилювання палива форсунками. При розмірі дисперсної фази 35...43 мкм концентрація  $\text{NO}_x$  була максимальною (мінімальна концентрація частинок сажі відповідає максимальному значенню концентрації  $\text{NO}_x$ ).

В роботі [25] для зниження викидів оксиду азоту на 30 % пропонують спалювати ВЕП з

вмістом води 15 %. Така кількість води як оптимальна пропонується і в праці [26]. Зокрема автори [26] дослідили, що оптимальний вміст води у водомазутній емульсії складає 10-15 %. При цьому спостерігається підвищення світності факела, інтенсифікується процес згоряння мазуту, зменшується закоксованість форсунок і знижується концентрація частинок сажі. Застосування такої ВЕП підвищує ККД теплових агрегатів на 3-5 %, зменшує викиди оксиду вуглецю і сажі на 50-80 %, оксидів азоту на 30-35 %, бенз(а)пірену на 50-90 %.

Оптимальний розмір частин [27] дисперсної фази складає 3-10 мкм при спалюванні нафти. На основі проведених експериментів її спалювання недопустиме в топках парових котлів без їх попередньої модернізації. В іншому випадку паливо повністю не згорить, відбудеться забруднення топкового тракту і відкладуться продукти неповного його згоряння, що є пожежо- та вибухонебезпечним, підвищиться токсичність димових газів. Натомість, при підготовці сирової нафти до спалювання як водопаливної емульсії досягається повне вигорання палива (практично з нульовим хімічним і механічним недопалом), що виключає також виникнення аварійних ситуацій. При цьому немає необхідності у модернізації топково-пальникових пристроїв котла. У роботі [27] вдалося із сирової нафти підготувати паливну водонафтову емульсію, при спалюванні якої в паровому котлі спостерігалось зниженням хімічного недопалу в 4 рази та збереження ефективної роботи енергетичного обладнання.

Висока дисперсність є основною вимогою приготування стабільної ВЕП [28]. Стабільність емульсії, в основному, залежить від швидкості осадження великих крапель води розмірами більше 30 мкм. Вважається, що крапель даного розміру в об'ємі емульсії повинно бути не більше 10 %. Тому при формуванні вимог до паливних емульсій висуваються такі вимоги [28]:

- розмір часток води в паливі має бути у межах 5...10 мкм;
- забезпечення можливості приготування емульсії будь-якого необхідного складу з вологістю в межах 5...50 %.

З вищенаведеного літературного огляду та проведеного експерименту випливає, що із зменшенням діаметрів крапель води покращується якість горіння ВЕП. Проте згідно з інформацією авторів [27] надзвичайно малі частинки води не забезпечують потрібного ефекту „мікробибуху”, завдяки якому здійснюється додаткове подрібнення крапель палива після їх розпилення у зоні горіння. Як наслідок, при

цьому досягається найбільш ефективне згоряння палива. Максимальний ефект від „мікробибухів” для водно-мазутної емульсії досягається при середньому значенні діаметра дисперсних частинок води 5-15 мкм (0,1 від діаметра краплі емульсії, розпиленої форсункою в топці). Автори [27] вказують на те, що явище „мікробибуху” для кожної водно-паливної емульсії має оптимальне значення дисперсності, за якого досягається максимальний ефект від спалювання.

### Висновки

Аналіз відомих досліджень показує суперечливість теорій, які описують вплив дисперсності та кількості води у емульсії на показники її горіння. Це може бути наслідком впливу різних фізичних характеристик палива: складу, в'язкості, температури тощо.

Встановлено, що оптимальне значення кількості води у ВЕП знаходиться в межах 3–30%. Величина дисперсності води у ВЕП – має широкий діапазон – від часток мікрметра до декількох міліметрів, проте його оптимальні значення знаходяться в межах 1-35 мкм.

Оскільки дослідження проводились за різних умов та режимів роботи обладнання, з різними паливними емульсіями, можна припустити, що існує оптимальне співвідношення між дисперсністю та кількістю води у ВЕП. Визначення кількісних характеристик цього співвідношення потребує додаткових експериментальних досліджень

### Література

1. <http://www.ukrstat.gov.ua/>
2. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/927-2013-%D0%BF>
3. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/927-2013-%D0%BF#n155>
4. <https://strana.ua/news/127406-tets-5-i-tets-6-pereshli-na-mazut-i-uverjajut-hto-batarei-kholodnee-ne-stanut.html>
5. Гридин С.В., Хохлова А.Л. Оценка эколого-экономического эффекта от использования в качестве топлива водо-мазутной эмульсии, приготовленной из мазутосодержащих отходов. *Промышленная теплотехника*. 2010. № 3. С. 59-63.
6. ДСТУ 4058-2001 Державний стандарт України. Паливо нафтове. Мазут. Технічні умови.
7. Иванов В. М. Топливные эмульсии. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 407.

8. Сергеева Ю.Н. Горбунов А.Д. Черниченко В.Е. Состояние проблемы получения и сжигания котельного топлива на основе водомазутной эмульсии. URL: <http://pdaa.com.ua/pr/pdf/25.pdf>
9. Крайнов В.В. Улучшение энергоэкологических показателей котельных установок предприятий железно-дорожного транспорта сжиганием водомазутных эмульсий: автореф. дисс. Омск, 2000. 21с.
10. Тув И.А. Сжигание обводненных мазутов в судовых котлах. Л.: Судостроение, 1968. С. 314.
11. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Недра, 1988, 312с.
12. Абрамов А. К. Повышение эффективности стальных отопительных котлов малой мощности при сжигании газообразного и жидкого топлива: дис... канд. техн. наук. Л., 1983. 162 с.
13. Рапиевец Л. С. Исследование процесса получения и свойств топливных эмульсий из обводненных торфяных смол, мазутов и др. применительно к их сжиганию: Дис... канд. техн. наук. М. 1960. 147 с.
14. Meboldt H. Probleme der Luftreinhaltung im Hinblick auf die Emmission Gasformiger Schadstoffe bes Verbrennung-Sprossen. *Fernwärme Int.* 1974, 3, №1. P. 18-25.
15. Sommerland R.E., Welden R.P., Rai R.H. Nitrogen oxides emission: an analytical evaluation of test data. Proc. Of the American power conference, 1971. V. 33, P. 631–638.
16. Dibelius N. R., Hilt M. B., Johnson R. H. Reduction of nitrogen oxides from gas turbins by steam injection. Pap. Of the ASME, 1971, No 58, P. 76–82.
17. Цирульников Л. М. Подавление токсичных продуктов сгорания природного газа и мазута в котельных агрегатах. Научно-технический обзор. М.: ВНИИЭгазпром, 1977. 60 с.
18. Адамов В. А. Сжигание мазута в топках котлов. Л.: Недра, 1989. 304 с.
19. Корягин В.А. и др. Исследование содержания вредных веществ в продуктах сгорания ВТЭ. *Промышленная энергетика.* 1988. № 4. С. 45-48.
20. Корягин В.А. Сжигание водотопливных эмульсий и сниженее вредных выбросов на промышленно-отопительных котельных: автореф. дисс. ... дт.н. Санкт-Петербург, 1998.
21. Морозова Е. А. Разработка и исследование технологии эмульгирования мазута с целью оптимизации режимов горения в топке для повышения надежности, экономичности и экологической безопасности энергетических котлов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.01. Москва, 2008. 143 с.
22. Ведрученко В.Р., Крайнов В.В. Оптимизация подготовки тяжелого жидкого топлива к сжиганию в топках котельных и других топливосжигающих станок. *Омский научный вестник.* 2015. № 2. С. 144-147.
23. Сжигание в промышленных печах водомазутной эмульсии с добавлением присадки / Шагеев М.Ф., Юсупова Т.Н., Романов Г.В. и др. *Экспозиция. Нефть. Газ.* 2008. N 3/Н (июнь). С.43-46.
24. Акимов А.В. , Агеев М.С. Обеспечение экологичности котлов при сжигании водомазутных эмульсий. *Матеріали Республіканської науково-практичної конференції Сучасні енергетичні установки на транспортні, технології та обладнання для їх обслуговування / Під загальною редакцією к.т.н., доц. Настасенка В.О. Херсон: Видавництво Херсонського державного морського інституту, 2010. С. 5-9.*
25. Оценка интенсивности коррозионных процессов при сжигании водомазутных эмульсий в судовых котлах / А. В. Горячкин, Н. А. Дикий, В. В. Трубин, В. Н. Михайленко, М. А. Свиначенко, А. В. Соколенко, В. В. Мандровский. *Водный транспорт.* 2012. Вып. 2. С. 16-22. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodt\\_2012\\_2\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodt_2012_2_5).
26. Катин В.Д., Колесников О.И. Новое устройство для подготовки и малоотходного сжигания водомазутных эмульсий. *Международный журнал социальных и гуманитарных наук.* 2016. Т. 7. №1. С. 120-124.
27. Квасніков В. П., Осадчий В. В. Синтез інформаційно-вимірювальної системи контролю дисперсності водно-мазутних емульсій. *Наукові праці ДонНТУ.* 2018. випуск 130.
28. Горелик Г. Б. Водотопливная эмульсия – альтернативное топливо XXI века: монография. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2019. 202 с.

## References

1. <http://www.ukrstat.gov.ua/>
2. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/927-2013-%D0%BF>
3. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/927-2013-%D0%BF#n155>
4. <https://strana.ua/news/127406-tets-5-i-tets-6-pereshli-na-mazut-i-uverjajut-chto-batarei-kholodnee-ne-stanut.html>
5. Gridin S.V., Hohlova A.L. Otsenka ekologo-ekonomicheskogo efekta ot ispolzovaniya v

- kachestve topliva vodo-mazutnoy emulsii, prigotovlennoy iz mazutosoderzhaschih othodov. *Promyshlennaya teplotehnika*. 2010. No 3. P. 59-63. [in Russian]
6. DSTU 4058-2001 Derzhavniy standart Ukrainy. Palivo naftove. Mazut. Tehnichni umovy. [in Ukrainian]
7. Ivanov V. M. Toplivnyie emulsii. M.: Izd-vo AN SSSR, 1962. P. 407. [in Russian]
8. Sergeeva Yu.N. Gorbunov A.D. Chernichenko V.E. «Sostoyanie problemyi polucheniya i szhiganiya kotelnogo topliva na osnove vodomazutnoy emulsii». URL: <http://pdaa.com.ua/np/pdf/25.pdf> [in Russian].
9. Kraynov V.V. avtoreferat disertatsii Uluchshenie energoekologicheskikh pokazateley kotelnykh ustanovok predpriyatiy zheleznodorozhnogo transporta szhiganiem vodomazutnykh emulsiy. Omsk 2000. 21 p. [in Russian]
10. Tuv I.A. Szhiganie obvodnennykh mazutov v sudovykh kotlah. L.: Sudostroenie, 1968. P. 314. [in Russian]
11. Sigal I. Ya. Zashchita vozdukhnoy basseyna pri szhiganiy topliva. L.: Nedra, 1988, 312 p. [in Russian]
12. Abramov A. K. Povyshenie effektivnosti stalnykh otopitelnykh kotlov maloy moschnosti pri szhiganiy gazoobraznogo i zhidkogo topliva: dis... kand. tehn. nauk. L., 1983. 162 p. [in Russian]
13. Rapiovets L. S. Issledovanie protsessa polucheniya i svoystv toplivnykh emulsiy iz obvodnennykh torfyanykh smol, mazutov i dr. primenitelno k ih szhiganiyu: dis... kand. tehn. nauk. M. 1960. 147 p. [in Russian]
14. Meboldt H. Probleme der Luftreinhalung im Hinblick auf die Emmission Gasformiger Schadstoffe bes Verbrennung-Sprossen. *Fernwarme Int.* 1974, 3, No1. P. 18-25.
15. Sommerland R.E., Welden R.P., Rai R.H. Nitrogen oxides emission: an analytical evaluation of test data. Proc. Of the American power conference, 1971. V. 33, P. 631-638.
16. Dibelius N. R., Hilt M. B., Johnson R. H. Reduction of nitrogen oxides from gas turbins by steam injection. *Pap. Of the ASME*, 1971, No 58, P.76-82.
17. Tsurulnikov L. M. Podavlenie toksichnykh produktov sgoraniya prirodnoy gaza i mazuta v kotelnykh agregatah. Nauchno-tehnicheskii obzor. M.: VNIIEgazprom, 1977. 60 p. [in Russian]
18. Adamov V. A. Szhiganie mazuta v topkakh kotlov. L.: Nedra, 1989. 304 p. [in Russian]
19. Koryagin V.A. i dr. Issledovanie sodержaniya vrednykh veschestv v produktakh sgoraniya VTE. *Promyshlennaya energetika*. 1988. No4. C.45-48. [in Russian]
20. Koryagin V.A. avtoref. doktora «Szhiganie vodotoplivnykh emulsiy i snizhenie vrednykh vyibrosov na promyshlennno-otopitelnykh kotelnykh», Sankt-Peterburg, 1998. [in Russian]
21. Morozova E. A. Razrabotka i issledovanie tehnologii emulgirovaniya mazuta s tselyu optimizatsii rezhimov goreniya v topke dlya povysheniya nadezhnosti, ekonomichnosti i ekologicheskoy bezopasnosti energeticheskikh kotlov: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.14.01. Moskva, 2008. 143 p. [in Russian]
22. Vedruchenko V.R., Kraynov V.V. Optimizatsiya podgotovki tyazhelogo zhidkogo topliva k szhiganiyu v topkakh kotelnykh i drugih toplivoszhigayuschikh stanovok. Omskiy nauchniy vesnik. 2015. No 2. P. 144-147. [in Russian]
23. Shageev M.F., Yusupova T.N., Romanov G.V. and oth. Szhiganie v promyshlennykh pechakh vodomazutnoy emulsii s dobavleniem prisadki Ekspozitsiya. *Neft. Gaz*. 2008. No 3/H (iyun). P.43-46. [in Russian]
24. Akimov A.V., Ageev M.S. Obespechenie ekologichnosti kotlov pri szhiganiy vodomazutnykh emulsiy.: Materlali RespublikanskoYi naukovopraktichnoYi konferentsiYi Suchasni energetichni ustanovki na transportni, tehnologiyi ta obladnannya dlya Yih obslugovuvannya. Pid zagalnoyu redaktsiiyu k.t.n., dotsent Nastasenka V.O. Herson: Vidavnistvo Hersonskogo derzhavnogo morskogo Institutu, 2010. C. 5-9. [in Russian]
25. Otsenka intensivnosti korrozionnykh protsessov pri szhiganiy vodomazutnykh emulsiy v sudovykh kotlah / Goryachkin A.V., Dikiy N.A., Trubin V.V., Mihaylenko V.N., Svinarenko M.A., Sokolenko A.V., Mandrovskiy V.V. *Vodniy transport*. 2012. Vol. 2. P. 16-22. [in Russian] URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodt\\_2012\\_2\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodt_2012_2_5).
26. Katin V.D., Kolesnikov O.I. Novoe ustroystvo dlya podgotovki i maloethodnogo szhiganiya vodomazutnykh emulsiy. *Mezhdunarodnyi zhurnal sotsialnyh i gumanitarnykh nauk*. 2016. Vol. 7. No1. P. 120-124.
27. Kvasnikov V. P., Osadchiy V. V. Syntez informatsiyno-vymiriualnoi systemy kontroliu dyspersnosti vodno-mazutnykh emulsiy. *Naukovi pratsi DonNTU*, 2018. Vol 130. [in Ukrainian]
28. Gorelik G. B. Vodotoplivnaya emulsiya – alternativnoe toplivo XXI veka: monografiya. Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2019. 202 p. [in Russian]