

ПРОГНОЗУВАННЯ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРНОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2020, 2(61): 38–42
doi: <https://doi.org/10.15407/page2020.02.038>

УДК 662.757: 621.6.035

В.В. ГОНЧАРУК, д-р хім. наук, професор, академік НАН України, ORCID 0000-0003-4594-2440,
А.С. МАКАРОВ, д-р техн. наук, ст. наук. співр., ORCID 0000-0001-6077-4006,
І.М. КОСИГІНА, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8277-9745
Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України,
бул. Академіка Вернадського, 42, м. Київ–142, 03142

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО РІДКОГО ПАЛИВА В ЕНЕРГЕТИЦІ

Підприємства енергетичного комплексу, що працюють на традиційних вуглеводневих енергоресурсах, зокрема на твердому паливі (вугіллі), щорічно виробляють десятки мільйонів тон золошлакових відходів (ЗШВ) і сотні мільйонів кубометрів газоподібних викидів. Як перспективний підхід зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище та підвищення коефіцієнта корисної дії теплових електростанцій запропоновано застосування композиційного рідкого палива замість пилоподібного та шарового спалювання вугілля. Обґрунтовано доцільність використання в промислових енергоустановках композиційного рідкого палива (КРП). Відзначено переваги використання КРП в якості енергетичного палива порівняно з традиційними.

К л ю ч о в і с л о в а: композиційне рідке паливо, суспензійне паливо, теплові електростанції.

Безперервне забезпечення народного господарства країни газом, нафтою, вугіллям, електричною і тепловою енергією – одна з умов існування її економічної та політичної незалежності та національної безпеки. Основу енергетичної галузі України складають атомні та теплові станції.

Більшість енергоблоків теплових електростанцій України (ТЕС) розраховані на використання вугільного палива. Так за офіційними даними Міністерства енергетики та вугільної промисловості України, потужність енергоблоків ТЕС становить 29,36 ГВт, з них вугільні енергоблоки – 21,8 ГВт, що становить 41% потужностей загальної енергосистеми України. Максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД) вугільних ТЕС становить у середньому 29–31%, в той час як в європейських країнах цей показник становить 45% [1]. При цьому питомі витрати умовного палива на ТЕС України дуже великі й у разі роботи ТЕС на антрациті в середньому складають 397,1 г у.п. / 1 кВт год, що в 1,5 рази вище, ніж на європейських ТЕС [1–3].

Для вироблення електроенергії на вугільних ТЕС генеруючих компаній України необхідно 24 млн т кам'яного вугілля, 865 тис. т газу, 71,4 тис. т мазуту [1] і 2 млрд м³ води на рік [3].

В даний час відбувається переосмислення ролі та місця вугілля в забезпеченні енергетичної і економічної безпеки держави. При цьому збільшення частки вугілля в паливному балансі країни є стабілізуючим фактором захисту від виникнення глобальних енергетичних криз.

Однак екологічні проблеми, що виникають при широкому застосуванні вугільних енергоресурсів, потребують особливої уваги. Наслідки [4] використання вугілля як енергоносія найбільш вагомими для навколишнього середовища і здоров'я людини (порівняно з іншими паливами). Вміст домішок, мінеральних компонентів, сірки, азоту, важких металів багато в чому обмежує повсякденне застосування вугілля в якості екологічно прийнятної палива [4]. У разі його спалювання виділяються: азото- і сірковмісні (NO_x і SO_x) оксиди, леткі органічні сполуки (зола і пил), велика кількість вуглекис-

© В.В. ГОНЧАРУК, А.С. МАКАРОВ, І.М. КОСИГІНА, 2020

лого (CO_2) та чадного (CO) газу на одиницю виробленої енергії, а також різні сліди металів, які можуть розсіюватися на великих площах і серйозно впливати на здоров'я людини. Крім цього спалювання вугілля на теплових електростанціях призводить до великої кількості золошлакових відходів (ЗШВ), які містять (у випадку використання антрацитового вугілля) до 30% маси незгорілого вугілля (недопалу), що є однією з причин низького коефіцієнта корисної дії українських ТЕС. Ці відходи накопичуються в золовідвалах і потребують подальшої утилізації [5].

Останнім часом українські ТЕС зіткнулися з ще однією проблемою, яку вони долають у результаті високих економічних витрат і істотних технологічних ускладнень. Так деякі станції змушені були відмовитися від застосування антрациту та перейшли на використання газового вугілля. Однак використання газового вугілля має ряд труднощів через підвищені виділення з нього летких компонентів і високий рівень займання. Якщо у процесі переробки вугілля потрапить більше 16% кисню, буде вибух або пожежа.

Вирішення цих екологічних проблем вимагають розробки і впровадження нових екологічно чистих технологій, які змогли б забезпечити позитивний ефект для навколишнього середовища та більш високого ступеня використання палива, що добувається, тобто для підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) ТЕС. У зв'язку з цим у даний час розробляються різні методи підвищення ефективності енергетичних і транспортних установок і зниження їх впливу на навколишнє середовище. Дані методи можна умовно розділити на дві групи:

- удосконалення конструкцій енергогенеруючих агрегатів і двигунів;
- поліпшення експлуатаційних властивостей застосовуваних палив.

Однак можливості удосконалення існуючих конструкцій, наприклад, енергетичних котлів, а для транспортних установок – двигунів внутрішнього згорання, вже підійшли до своєї технологічної межі. Подальше збільшення ККД досягається значним ускладненням агрегатів, появою додаткових пристроїв, що тягне за собою часто непропорційне збільшення їх вартості.

Тому більш перспективним на сьогоднішньому етапі є другий напрямок – не тільки поліпшення характеристик традиційних органічних палив, але і створення нових енергоефективних технологій з урахуванням утилізації різних енергомістких відходів, наприклад відходи вугільного та нафтового походження, побічні сполуки органічного синтезу, відпрацьовані змащувально-охолоджувальні суспензії, відходи харчової, спиртової та целюлозної промисловості, барвники тощо. Промислові та побутові стічні

води також часто містять значну частку органічної складової. Всі ці відходи є енергонасиченими і можуть використовуватись при розробці технологій одержання текучого композиційного палива. Освоєння технологій ефективної утилізації цих промислових відходів стає актуальним завданням для енергетичної галузі, так як можливо забезпечити істотне зниження впливу роботи теплових електричних станцій (ТЕС) на навколишнє середовище. Спалювання відходів вуглевидобутку та нафтопереробки на ТЕС у початковому стані досить важко, тому що вимагає зміни топкових камер, модифікації систем приготування палива, транспортування і зберігання. Тому викликає інтерес створення композиційних рідких палив (КРП) для спалювання в режимах, підтримуваних ТЕС, а також котельнями та іншими енергетичними установками без значних конструктивних змін [6].

Композиційне рідке паливо – стійка паливна суміш на основі двох і більше компонентів, для приготування якої використовуються сучасні високоефективні пристрої, такі як дезінтегратори, вібрмлини, апарати віхрового шару, проточні млини-активатори, кавітаційні апарати.

Застосування композиційних рідких палив на основі вугілля перспективно з кількох причин [7–9]. По-перше, в якості основи можуть використовуватися вугілля різних марок, зокрема, бурі, використання яких в якості енергетичної сировини пов'язано з певними труднощами через їх високу вологість, схильності до самозаймання, а також вугілля, що добуваються гідравлічним способом, дрібних класів і вугільних шлаків [8]. По-друге, при відповідному підборі компонентів можна отримувати паливо з заданими властивостями та використовувати його в різних енергетичних агрегатах. У той же час, використання КРП дозволяє підвищити повноту згорання твердих частинок палива за рахунок ефекту «мікровибуху» крапель суспензії, при цьому знижується максимальна температура горіння, а відповідно і викиди сажі, бенз(а)пірену і оксидів азоту [9].

Роботи зі створення композиційних і емульсійних палив із заданими експлуатаційними властивостями проводяться як вітчизняними, так і зарубіжними вченими ще з 70-х років минулого століття. Наприклад, у роботі [10] навіть подано класифікацію таких палив, яка включає водо-вугільні, водо-мазутні, мазуто-вугільні, метанолвугільні й інші види. При проведенні даних досліджень простежується прагнення вирішити кілька основних завдань: по-перше, знизити викиди забруднюючих речовин за рахунок інтенсифікації спалювання і взаємовпливу компонентів; по-друге, використовувати відходи виробництва та переробки в якості одного з горючих компонентів, наприклад, вугіль-

ні і нафтові шлами, замазучені стоки; по-третє, знизити вартість палива за рахунок використання більш дешевих і доступних складових. Найбільший прогрес досягнутий у використанні суспензійних палив (СП), є досвід їх успішного промислового застосування в якості палива для котлів і дизельних двигунів [11].

Суспензійне паливо – висококонцентрована дисперсна система, в якій в якості горючої основи використовуються дисперсна фракція вугілля будь-якої калорійності та рідка фаза, що складається з води і органічних відходів виробництва, з добавками пластифікаторів і стабілізаторів [12]. Добавки вводяться в суспензії для зниження їх в'язкості і опору, а також для забезпечення агрегативної та седиментаційної стійкості при високих концентраціях твердої фази в системах.

В якості рідкої фази можуть використовуватися стічні води виробництва. Індустріальні стічні води зазвичай містять органічні речовини, пави, агресивні окислювачі, кислоти й луги. Різноманітність компонентного та сольового складу, а також їх великі обсяги роблять проблему їх утилізації. Їх демінералізація і детоксикація вимагають застосування дорогих методів зворотного осмосу, іонного обміну або електродіаліз. При цьому агресивні компоненти стічних вод інтенсифікують знос апаратури внаслідок корозії [13, 14]. Скид недостатньо очищених вод підвищує екологічне навантаження на навколишнє середовище і ускладнює використання природних вододжерел як джерела промислового та питного водопостачання [13, 15]. У той же час неочищені води можна використовувати при виготовленні суспензійного палива. При цьому комплексно вирішується проблема їх утилізації, і знижуються водовитрати на приготування суспензії.

За умовами горіння і ступеня вигорання вуглецю СП істотно відрізняються від вугілля і наближаються до рідких палив. Мінеральні компоненти вугілля при вигоранні краплі агломеруються, утворюючи високопористі сфери, що дозволяє вести процес горіння з малим надлишком повітря, що призводить до підвищення теплоти згорання вугілля [12]. Дрібнодисперсні частки золи при згоранні об'єднуються у великі (0,3–0,5 мкм), міцні, пористі ксеносфери, які легко виділяються у звичайних механічних сепараторах. Ступінь уловлювання таких зольних агломератів досягає 99–99,5%, що різко скорочує викид твердих часток в атмосферу (табл.1) [16].

Використання СП через форсунки енергетичних установок забезпечує високу ступінь спалювання, що призводить до зниження недопалу, а також зменшення забруднення робочих поверхонь нагріву в котлоагрегатах ТЕС. Присутність води в вигляді перегрітої пари в зоні

горіння сприяє більш тонкому розпорошенню вуглецевої основи за рахунок мікробухів суспензійний крапель [17]. В результаті цих ефектів за рахунок більш повного вигорання палива знижується кількість сажі, бенз(а)пирена і вторинних вуглеводнів у газах. Внаслідок високої калорійності, при використанні СП, в пічному просторі можна досягати температур до 1400 °С. Це дає можливість безпечно спалювати шкідливі органічні відходи виробництв або використовувати в якості рідкого середовища паливного складу відпрацьовані промислові стічні води, які можуть містити токсичні органічні речовини, тому що всі органічні токсиканти при температурі понад 1200 °С розкладаються і повністю згоряють у складі СП з форсунок.

Таблиця 1. Кількість шкідливих речовин у продуктах згорання різних видів палива

Шкідлива речовина	Кількість шкідливих речовин у продуктах згорання, г/м ³			
	вугілля	мазут	газ	СП
Пил, сажа	100–300	2–5	0,5	1–5
Оксиди азоту	250–600	150–750	50–200	30–100
Оксиди сірки	400–800	400–700	–	100–200

При впровадженні та використанні технології водо-вугільного палива існує ряд обмежень і труднощів. По-перше, низька температура горіння і незначне виділення тепла. По-друге, нестабільні характеристики пластичності при тривалому зберіганні призводять до необхідності введення хімічних добавок і обмежують широке поширення.

Тому цікавим і перспективним напрямком є приготування та використання масляно-водо-вугільних палив. Причому областю їх використання може бути не тільки енергетика, а й транспорт, особливо суднові й тепловозні двигуни. Серед суднових дизельних двигунів найкращі перспективи є у малооборотних двигунів, що використовують у даний час важкі нафтові палива [18]. Крім того, за рахунок більш низької ціни вугільного палива порівняно з нафтовим, використання масляно-водо-вугільних емульсій (МВВЕ) може сприяти зниженню собівартості перевезень. В якості рідкого горючого компоненту при приготуванні МВВЕ можуть використовуватись відходи нафтовидобутку та нафтопереробки, відпрацьовані горючі рідини (моторні, трансформаторні, турбінні масла), емульсії, суспензії, промислові стоки й інші рідкі органічні відходи.

Це дозволить вирішити ще одну екологічну проблему: одночасне збільшення обсягів споживання нафтопродуктів у транспортній та енергетичній системах, а також активний розвиток групи

галузей промисловості (особливо нафтохімічної і нафтопереробної), що призводить до накопичення численних відходів у вигляді відпрацьованих масел, нафтошламів та інших нафтовмісних рідин [19–22]. Темпи утворення подібних речовин досить великі. Наприклад, тільки відпрацьовані моторні масла щорічно акумулюються в обсягах 30–40 млн метричних тонн (табл. 2).

Накопичення і складання подібних нафтових відходів не завжди є надійним способом зберігання з метою подальшої утилізації або регенерації. Потрапляючи в різні стоки і водойми, нафтові компоненти можуть завдати великої шкоди навколишньому середовищу [25].

Таблиця 2. Обсяги виробництва відпрацьованих нафтопродуктів

Моторні масла	Енергетичні масла	Нафтошлами
щорічно утворюється 30–40 млн метричних тонн [21–22]	щорічно утворюється 32–35 млн метричних тонн [23]	щорічно утворюється 60 млн метричних тонн, вже накопичено в світі понад 1 млрд метричних тонн [19]

У роботі [6] проведено екологічний, енергетичний та економічний аналіз застосування масляно-вугільного палива. Проведені оцінки в першому наближенні ілюструють значний потенціал таких палив у зв'язку з можливостями масштабної утилізації багатьох небезпечних відходів в їх складі, заміни дорогих і дефіцитних видів палив, диверсифікації сировинного ринку, а також вирішення ряду проблем, що виникають при експлуатації пилувугільних котельних і ТЕС (пожежо- і вибухонебезпечність вугільного пилу, забруднення атмосфери викидами шкідливих речовин).

Результати підсумку усіх витрат, необхідних при переході з традиційного палива на композиційне рідке паливо (КРП), представлено в табл. 3. Розглянуті паливні суспензії мали наступні концентрації компонентів КРП у своєму складі: № 1 (фільтркекі кам'яного вугілля 49,5%, фуси 10%, пластифікатор 0,5%, технічна вода 40%); № 2 (філь-

тркекі кам'яного вугілля 49,5%, нафтові відклади 10%, пластифікатор 0,5%, технічна вода 40%); № 3 (фуси 15%, кам'яне вугілля 44,5%, пластифікатор 0,5%, технічна вода 40%); № 4 (фільтркекі кам'яного вугілля 49,5%, моторне масло 10%, пластифікатор 0,5%, технічна вода 40%).

ВИСНОВКИ

Використання дешевих паливних ресурсів у вигляді композиційного рідкого палива (КРП) дуже важливо для енергетики, народного господарства та комунально-побутової сфери, так як воно належить до доступних і екологічно чистих видів палива і, в свою чергу, відкриває широкі перспективи в області їх використання та енергозбереження. КРП вирішує проблему утилізації різних вугільних відходів, незалежно від їх стану і змісту. Крім того, порівняно з вартістю твердого палива, одна тонна КРП в середньому на 50% дешевше однієї тонни твердого палива з урахуванням вирівняною калорійності [6]. За своїми характеристиками це паливо близьке до мазуту, а за деякими параметрами навіть перевершує його. На відміну від мазуту, композиційна рідке паливо дешевше, відрізняється кращими екологічними властивостями і може вироблятися за рахунок використання місцевих паливних ресурсів. При знижених температурах паливо має більш низьку в'язкість, ніж мазут, і легше перекачується без попереднього підігріву. Перехід вугільних ТЕС з традиційного твердого палива (вугілля) на композиційні рідкі палива дозволить вирішити кілька глобальних проблем. Перша – утилізація широкого класу відходів вугле- і нафтопереробки. Це дозволить не тільки утилізувати вже накопичені відходи, але також запобігти накопиченню знову відходів, що утворюються. Друга – зниження концентрацій антропогенних викидів вугільними підприємствами енергетики (SO_x на 40%, NO_x на 20%), що призведе до зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Третя – раціональне використання природних ресурсів. Це може привести до економії одних тільки паливних витрат на сотні млн грн. на рік.

Таблиця 3. Грошові потоки при переході ТЕС на КРП [6]

Перелік витрат, млн грн.	Традиційне паливо	Склад композиційного рідкого палива			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Паливні витрати	2246,45	291,23	322,79	1180,24	1364,01
Експлуатаційні витрати	17,54	5,08	5,01	4,93	5,01
Витрати на обладнання системи паливного господарства	321,65	35,62	35,625	35,62	35,62
Підсумкові витрати	2585,64	333,72	365,21	1222,58	1406,43
Економія	–	2251,91	2220,42	1363,06	1179,17

Отже використання КРП як паливо енергогенеруючих підприємств зменшує забруднення навколишнього середовища, підвищує ступінь його спалювання, а отже і ККД теплових агрегатів (ТЕС), дозволяє утилізувати велику кількість відходів та отримати більш дешеве паливо.

1. Перов М.О., Макаров В.М., Новицький І.Ю. Аналіз потреби ТЕС України в енергетичному вугіллі з урахуванням вимог до якості палива. *Проблеми загальної енергетики*. 2016. Вип. 3 (46). С. 40—49. <https://doi.org/10.15407/pe2016.03.040>

2. Халатов А.А. Енергетика України: сучасний стан і найближчі перспективи. *Вісник НАН України*. 2016. № 6. С. 53—61.

3. Сердюк О.С. Сучасний стан та перспективи розвитку українських ТЕС. *Економічний вісник Донбасу*. 2016. № 3(45). С. 4—10.

4. Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С., Чернявський М.В., Топал О.І., Засядько Я.І. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України. К.: ГНОЗИС. 2013. 306 с.

5. Дмитриенко М.А., Няшина Г.С., Шлегель Н.Е., Шевырев С.А. Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий. *Проблеми енергетики*. 2017. Вып. 19. № 3-4. С. 41—52.

6. Курганкина М.А., Вершинина К.Ю., Озерова И.П., Медведев В.В. К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на органоводоугольные топливные композиции. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329, № 9. С. 72—82.

7. Горлов Е.Г. Композиционные водосодержащие топлива из углей и нефтепродуктов. *Химия твердого топлива*. 2004. № 6. С. 50—61.

8. Мальшев Ю.Н. Уголь и альтернативная экологически чистая энергетика. Общеэкономические аспекты. М.: Издательство Академии горных наук, 2000. 96 с.

9. Мохов В.Ф., Горлов Е.Г., Головин Г.С. Угольно-углеводородные композиционные топлива из углей Кузбасса. *Химия и природосберегающие технологии использования угля: Сборник трудов международной конференции*. М.: Издательство МГУ, 1999. С. 69—71.

10. Титов Е.В., Хилько С.Л. Получение и использование в энергетике экологически чистых видов альтернативных топлив на основе эмульсий и суспензий. URL: http://nich.dgtu.donetsk.ua/konf/konf4/sek_06_him/s06_23.pdf (дата звернення: 14.04.2020).

11. Грехов Л.В. Исследование и проблемы создания дизельного двигателя на угольных суспензиях. *Безопасность в техносфере*. 2007. № 5. С. 33—36.

12. Макаров А.С. Перспективы развития и использования водоугольного топлива. *Энерготехнологии*

и ресурсосбережения. 2018. № 2. С. 3—9. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2018.01>

13. Пинчук В.А., Губинский М.В., Потапов Б.Б. Использование водоугольного топлива и продуктов его переработки в энергетике и металлургии. *Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України*. Днепропетровск: Новая идеология, 2008. С. 221—227.

14. Макаров А.С., Клищенко Р.Е., Завгородний В.А., Макарова Е.В. Влияние солевого состава воды на свойства водоугольных суспензий. *Химия и технология воды*. 2011. Т. 33, № 6. С. 601—611

15. Пилипенко А.Т., Гороновский И.Т., Гребенюк В.Д., Запольский А.К., Кучерук Д.Д., Максин В.И., Рудь А.М., Загороднюк А.К. Комплексная переработка шахтных вод. Киев: Техніка, 1985. 183 с.

16. Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенко В.И., Дзюба Д.А. Результаты исследования вредных выбросов при сжигании суспензионного угольного топлива. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2012. Т. 5, № 5. С. 512.

17. Parres-Esclapez, S., Illan-Gomez M.J., Salinas-Martinez de Licea C., Bueno-Lopez A. On the importance of the catalyst redox properties in the N₂O decomposition over alumina and ceria supported Ph, Pd and Pt *Applied Catalysis B: Environmental*. 2010. Vol. 96. P. 370—378.

18. Возницкий И.В. Практика использования морских топлив на судах. Санкт-Петербург, 2005. 124 с.

19. BP Statistical Review of World Energy. London. 2016. 30 p. URL: <http://www.bp.com> (дата звернення: 03.05.2020).

20. Tripathi, A.K., Ojha D.K., Vinu R. Selective production of valuable hydrocarbons from waste motorbike engine oils via catalytic fast pyrolysis using zeolites. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2015. Vol. 114. P. 281—292.

21. Lam S.S., Liew K., Cheng C.K., Chase H.A. Catalytic microwave pyrolysis of waste engine oil using metallic pyrolysis char. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2015. Vol. 176—177, No. 1. P. 601—617.

22. Chayka, O.G. Kovalchuk O.Z., Chayka Y.A. Monitoring the formation of waste oils. *Proceedings Scientific Works, Lviv Polytechnic National University, Lviv*, 2009. P. 221—224.

23. International Energy Outlook with projections to 2040. Washington: U.S. Energy Information Administration. 2013. 234 p. URL: <http://www.eia.gov> (дата звернення: 03.05.2020).

24. Kapustina, V., Havukainen J., Virkki-Hatakka T., Horttanainen M. System analysis of waste oil management in Finland. *Waste Management & Research*. 2014. Vol. 32, No. 4. P. 297—303.

Надійшла до редколегії: 15.05.2020