

УДК 662.7

## КАВІТАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА НОВЕ ТЕПЛОМАСООБМІННЕ ОБЛАДНАННЯ – ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМОК ПРИГОТУВАННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

Ободович О.М.<sup>1</sup>, д.т.н., Целень Б.Я.<sup>2</sup>, к.т.н., Переяславцева О.О.<sup>3</sup>, к.т.н., Степанова О.Є.<sup>4</sup>, к.т.н.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст 2а, Київ, 03680, Україна

<sup>1</sup>завідувач відділу, професор НАН України, e-mail: tdsittf@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

<sup>2</sup>пров.н.с., с.н.с., e-mail: b0d@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

<sup>3</sup>пров.н.с., с.н.с., e-mail: alena\_p11@ukr.net

<sup>4</sup>с.н.с., e-mail: super-olesya2807@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7179-7251>

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.10>

*Проведений аналіз існуючих технологій та обладнання для приготування водовугільного палива показав ефективність кавітаційного впливу на водовугільну суміш. Запропоновано нові технології та тепломасообмінне обладнання, що працюють на основі методу ДІВЕ як перспективного напрямку в приготуванні водовугільного палива.*

*The analysis of existing technologies and equipment for the preparation of hydro-coal fuel showed the effectiveness of the cavitation effect on the hydro-coal mixture. New technologies and heat and mass exchange equipment operating on the basis of the DPIE method are proposed as a promising direction in the preparation of hydrocarbon fuels.*

Бібл. 15, рис. 6, табл. 2.

**Ключові слова:** водовугільне паливо, дискретно-імпульсне введення енергії, кавітація, роторно-пульсаційні апарати, тепломасообмінне обладнання.

ВВП – водовугільне паливо;

ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;

ДІВЕ – дискретно-імпульсний введення енергії;

ІТТФ – Інститут технічної теплофізики;

НАНУ – Національної академії наук України;

НПЗ – нафтопереробний завод;

РВТ – ресивер високого тиску;

РНТ – ресивер низького тиску;

РПА – роторно-пульсаційний апарат;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

УВВП – універсальне водовугільне паливо;

ШРКП – штучні рідкі композиційні палива.

У зв'язку з відхиленнями у стабільній роботі атомних та гідроелектростанцій через військові дії у найближчій перспективі прогнозується підвищення ролі вугілля у паливно-енергетичному балансі України, що зумовлено його великими запасами. Однак екологічні обмеження (особливо після ратифікації Кіотського протоколу) вимагають розробки та впровадження нових екологічно чистих вугільних технологій, що забезпечують найповніше використання палива за максимально зниженого шкідливого навантаження на довкілля.

Враховуючи, що імпорту нафти та газу скорочуються, збільшується вартість їх виробництва та постачання, вугілля в Україні стає практично єдиним енергоносієм місцевого походження. Для подолання критичної ситуації, що склалася у паливно-енергетичному комплексі країни, намітилися тенденції щодо

розробки та реалізації програм енергозбереження, а також створення та впровадження нових, ефективних, екологічно чистих паливних технологій. Однією з головних вважається перехід на широке використання водовугільного палива (ВВП) [1, 2].

Мета роботи – на основі аналізу існуючих технологій та обладнання для приготування водовугільного палива показати ефективність кавітаційного впливу на водовугільну суміш та запропонувати нові технології та тепломасообмінне обладнання, що працюють на основі методу ДІВЕ, як перспективного напрямку в приготуванні ВВП.

Водовугільне паливо, водовугілля (ВВП) – рідке паливо, яке отримують шляхом змішування подрібненого вугілля, води та пластифікатора. Використовується на теплогенеруючих об'єктах, здебільшого як альтернативи-

ва природному газу та мазуту. Дозволяє суттєво зменшити витрати при виробництві теплової і електричної енергії. Концептуально належить до технологій “чистого вугілля”.

ВВП має задані реологічні (в'язкість, напруга зсуву), седиментаційні (зберігання однорідності у статичних та динамічних умовах) й паливні (енергетичний потенціал, повнота вигорання органічних сполук) характеристики (табл. 1). Параметри водовугілля чітко регламентовані національними стандартами Китаю [3], які можуть застосовуватися як еталон. Також для водовугільного палива характерні такі властивості: температура займання – 800-850 °С, температура горіння – 950-1150 °С, теплотворна здатність – 370-4700 Ккал. Ступінь згорання вуглецю понад 99 %. Водовугілля пожежо- та вибухобезпечне. Застосовується як паливо для промислового котла, електричного котла і промислової печі замість мазуту та газу; і сировина для газифікації вугілля.

#### Основні світові напрацювання в галузі водовугільного палива [4]:

В Китаї дана технологія є однією з основних запроваджених у країні з метою зниження залежності від дефіцитних рідких та газоподібних видів палива. На сьогодні Китай – світовий лідер у галузі розробок та впровадження водовугільного палива у тепло- та електроенергетиці. Щорічний обсяг виробництва водовугільного палива становить 40-60 млн. тонн.

Провідними розробниками технології водовугілля в Китаї є Пекінський науково-дослідний вугільний інститут, Пекінський вугільний проектний інститут, Гуобанська науково-технологічна компанія, Шеянський теплоенергетичний інститут. До найбільших проектів, реалізованих у Китаї, слід віднести: 1998 р. Шандунська ТЕЦ (220 тонн пари на годину); 2003 р. Шеньянський НПЗ (75 тонн пари на годину); 2004 р. ТЕЦ у м. Тінгдао (130 тонн пари на годину, 2 турбіни на 12 та

25 МВт); 2004 р. Гуандунська ТЕЦ (670 тонн пари на годину); 2005 р. завод приготування водовугілля та ТЕЦ у м. Маомінь (440 тонн пари на годину, 1,5 млн. тонн водовугілля).

В Японії до вдало реалізованих та значущих проектів слід віднести: 1986 р. Mitsubishi Heavy Industries (Енергетична станція, 260 тонн пари на годину, 75 МВт); 1989 р. Hitachi Zosen (34 тонн пари на годину); 1990 р. Japan COM (110 тонн пари на годину, доставка палива танкером на відстань 680 км); 1993 р. Japan CJM Ltd (котел енергетичної станції 600 МВт).

В Італії технологія розроблялася при пошуку еквівалентної заміни для нафти та зручних рішень з транспортування вугілля на довгі відстані. Фірмою Snamprogetti (Мілан) було розроблено технологію приготування палива Reosab, основною особливістю якої є отримання близького до бімодального розподілу часток за розмірами. Було споруджено комплекси з приготування водовугілля у м. Ліворно та Порто-Торрес, переобладнано енергетичні станції фірми ENEL потужністю 35 та 75 МВт.

Швеція відома своїми розробками з приготування водовугільного палива, якими займалися компанії АВ Carbogel, Nycol, Fluidcarbon international АВ. Особливість технологій цих фірм полягає у використанні низькозольного вугілля, що передбачає застосування процесу глибокого збагачення вугілля. Технологія приготування передбачає: двостадійний помел, грохочення, пінну флотацію, зневоднення кеку на вакуумних фільтрах, перемішування кеку з водою та реагентом. За рахунок такого процесу отримують водовугільне паливо з високими якісними характеристиками: зола до 2,8 %, тверда фаза до 75 %, в'язкість 1000 МПа/с, нижча теплота згорання – 20 МДж/кг.

У Канаді компанією Lafard Canada Inc. у 1984 було продемонстровано процес приготування водовугілля безпосередньо перед спаленням у роторній цементній

Табл. 1. Параметри водовугільного палива [3]

| Параметри                              | I клас       | II клас   | III клас  | Стандарт Китаю |
|----------------------------------------|--------------|-----------|-----------|----------------|
| Вміст вугілля, %                       | ≥ 65         | 63-65     | 60-63     | GB/T18856.2    |
| В'язкість                              | ≤ 1200 мПа/с |           |           | GB/T18856.4    |
| Теплота згорання (нижча), Ккал         | ≥ 4700       | 4420-4660 | 4000-4420 | GB/T 213       |
| Зольність, %                           | ≤ 6          | 6-8       | 8-10      | GB/T 213       |
| Вміст сірки, %                         | ≤ 0,35       | 0,35-0,65 | 0,65-0,80 | GB/T 214       |
| Температура пом'якшення плавкості золи | ≤ 1250       |           |           | GB/T 219       |
| Частинки (зерна) понад 300 мкм, %      | ≤ 0,05       | 0,05-0,20 | 0,20-0,80 | GB/T18856.3    |
| Частинки (зерна) до 75 мкм, %          | ≥ 75,0       |           |           |                |
| Вміст летких речовин, %                | >30          | 20-30     | ≤ 20      | GB/T18856.7    |

печі. Характерно, що для приготування використовувалося вугілля та хвости мокрого процесу збагачення. У зв'язку з відсутністю необхідності у транспортуванні та збереженні використовувалися лише найпростіші реагенти з метою покращення диспергації та зниження в'язкості. Подальші розробки технології водовугільного палива було скорочено у зв'язку зі зниженням цін на нафту та нафтопродукти.

Основною передумовою початку розробок технології водовугільного палива в США стала необхідність утилізації відходів мокрого збагачення вугілля (40-50 млн. тонн на рік) та пошук ефективних засобів транспортування вугілля на великі відстані. Зокрема, на електростанції "Сивард Стейшн" було проведено сумісне спалення водовугілля та пиловугілля.

#### Основні сучасні технології [4]:

- "Reocarb" (Італія, СРСР). Технологія передбачає помел у кульовому млині порівняно низькоконцентрованої суміші, а потім грубий помел у стержневому млині при певних співвідношеннях крупної (0-3 мм) та тонкої (0-0,040 мм) фракцій і підвищенням концентрації водовугільного палива до 62-65 % з використанням пластифікатора. При цьому гранулометричний склад вугілля в суспензійному середовищі при двостадійному помелі наближається до бімодального. Зольність вугілля знаходиться в межах 10-20 %. Водовугільне паливо, отримане таким чином, має добрі споживчі властивості і може транспортуватися по трубах на великі відстані та зберігатися протягом тривалого часу без зміни характеристик.

- "Carbogel" (Швеція, Канада). Технологія включає двостадійний помел вугілля в кульових млинах з наступним збагаченням вугілля методом флотації. Змішування збагаченого і частково зневодненого вугілля з водорозчинною хімічною добавкою проводиться в гомогенізаторі до отримання стабільного водовугільного палива. При вихідній зольності вугілля 15 %, зольність кінцевого продукту складає 2,8-4,0 %. Максимальна масова концентрація вугілля у суспензії – 75 %.

- "Co-Al" (Велика Британія). Основною особливістю технології є точна відповідність гранулометричного складу вугілля у водовугільному паливі заданому. Обов'язковою умовою є максимальний вміст у суспензії колоїдних частинок розміром менше 0,003 мм. Технологічна схема передбачає двостадійне подрібнення суміші вугілля і збагаченого флотоконцентрату в присутності водорозчинної хімічної добавки. Контроль крупності здійснюється на грохоті. При необхідності верхній продукт грохочення повертається на повторне

подрібнення. Кінцевим продуктом є водовугільне паливо зольністю 6,5 % при максимальному вмісті в ньому твердого до 72 %.

- "Fluidcarbon" (Швеція). Шведська фірма "Флюїдкарбон інтернейшнл" розробила спосіб отримання котельного палива у вигляді висококонцентрованої водовугільної суспензії. У складі палива, крім тонкоподрібненого низькозольного вугілля та води, є спеціальна хімічна добавка (близько 1 %). Приготування палива здійснюється в чотири стадії, що включають мокре подрібнення вугілля у кульових млинах, збагачення подрібненого продукту флотацією, зневоднення флотоконцентрату на барабанних вакуум-фільтрах, усереднення палива за якістю. В результаті таких технологічних операцій кінцевий продукт має зольність не вище 2,8 % при вмісті твердого 68 %. За патентом США водовугільна суспензія, одержана за технологією "Fluidcarbon", може мати концентрацію в межах 60-80 % вугілля за масою.

- "Densecoal" (Німеччина). Технологія розроблена фірмами BASF AG та "Salzgitter AG" і передбачає як мокре, так і сухе подрібнення вугілля. У процесі такого подрібнення отримують продукт із середньою крупністю 0,04 мм, хоча в принципі технологія дозволяє отримання різних гранулометричних складів вугілля і різної в'язкості суспензії. В залежності від якості вихідного вугілля і подальшого використання паливної композиції регулюють тривалість знаходження компонентів у млині, швидкість обертання його барабана, а також вихідну крупність, кількість і склад хімічних домішок.

На даний момент розвитку технологій приготування водовугільних палив одним із найперспективніших і найоптимальніших є його приготування з використанням ефекту кавітації. Такі водовугільні палива часто називають кавітаційними водовугільними паливами. Штучні рідкі композиційні палива (ШРКП) є одним з підвидів таких палив, і є сумішшю з вугілля, води та інших компонентів, приготовлені з використанням спеціальних пристроїв-кавітаторів. Кавітаційна обробка – це вплив на середовище великими тисками (у тому числі і змінного значення) та температурами. Кавітаційна обробка дозволяє отримати однорідне дрібнодисперсне паливо стійке до седиментації. Це дозволяє зберігати кінцевий продукт тривалий час у різних резервуарах до його безпосереднього застосування у технологічному процесі (у разі спалювання). ШРКП (як підвид ВВП) також може містити технічний гліцерин, метанол і багато інших відходів хімічної промисловості, що підлягають утилізації шляхом спалювання.

Технологічна лінія, скомпонована у відповідності до способу виробництва ШРКП, показана на рис. 1.

Вугілля А з бункера 1 живильником-дозатором 2 подається в дробарку первинного подрібнення 3. Спочатку подрібнене до фракції 2 мм вугілля надходить у диспергатор ультратонкого подрібнення 4, в якому розмелюється до стану порошку з середнім розміром частинок 30 мкм. У міксері 5 вугільний порошок активно змішується з водою В і технологічними добавками С, що амеліорують властивості ШРКП. Суміш з міксера надходить у кавітатор 6, в якому проводиться дробка паливної композиції. При цьому утворюється значна ультрадисперсна фракція (5-10 мкм) вугільного компонента, а також відбуваються зміни в рідкій фазі. При необхідності, в залежності від марки вихідного вугілля, обробка палива може проводитися в циклічному режимі з використанням буферного бака 7, оскільки продуктивність кавітатора 6 вище продуктивності диспергатора 4. Готове паливо ШРКП надходить в бак 8. Схема запропонованої технологічної установки лінійна, що дуже зручно з погляду автоматизації технологічного процесу.

Найбільш перспективним способом на сьогоднішній день є спосіб із використанням двоступінчастого ведення процесу: на першому ступені здійснюють “сухе подрібнення” вугілля, а на другому – кавітаційне. Одним із них є спосіб отримання водовугільного палива за допомогою кавітаційно-вихрової технології, що дозволяє отримувати суспензію із середнім розміром частинок вугілля 6-10 мкм [5].

При розробці технологій отримання водовугільного палива найбільш раціонально, по можливості, поєднувати кілька простих процесів в одному пристрої (отримання води зі лужним значенням водневого показника, змішання, диспергування, гомогенізація). При кавітаційній обробці води, залежно від розчинених у ній домішок, спостерігається підвищення водневого показника в лужну область внаслідок, як передбачається

в роботі [6], утворення молекул води у “збудженому” (“активованому”) стані, радикалів водню та гідроксилу, іонів водню та гідроксильних іонів, молекул водню та пероксиду водню [7].

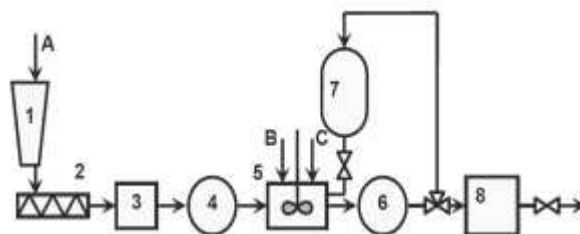
Також при кавітаційній обробці відбувається диспергування вугілля, деструкція молекул складових речовин із розпадом на окремі органічні складові з реакційно активною поверхнею частинок та значною кількістю вільних органічних радикалів з розміром частинок 6-10 мкм [8].

Водовугільне паливо повинне мати певні реологічні властивості. Залежно від реологічних властивостей водовугільне паливо може проявляти властивості ньютонівської (до 30 % дисперсної фази) та неньютонівської рідини (понад 30 % дисперсної фази) [9]. Крім цього, істотний вплив на реологічні властивості водовугільного палива надає температура.

В ІТТФ НАН України розроблено різноманітні технології і види кавітаційного обладнання, що працюють за методом ДІВЕ, рекомендовані для приготування водовугільного палива.

На рис. 2 показано схему експериментальної установки, що оснащена кавітаційним пристроєм із багаторазовим проходженням суспензії через кавітатор та вимірюванням швидкості потоку, розподілення кавітаційних бульбашок, температури, тиску, енергоспоживання.

Експериментальна установка складається з ємності 1 об'ємом 8 л, вимірювальної труби 2 діаметром 76 мм і довжиною 180 мм, виготовленої з спеціального скла, в якій встановлений закріплений на валу кавітатор 3, з'єднаний через муфту з валом електродвигуна 4, і трубопроводу рециркуляції 5. Тиск рідини вимірювали до і після кавітатора мановакуумметрами 6. Швидкість руху потоку рідини в трубі вимірювали витратоміром 7 і регулювали за допомогою вентиля 8, а температуру рідини в ємності вимірювали термopарою 9. Необхідне розрідження створювалося за допомогою вакуумного насоса 10.



**Рис. 1. Схема технологічної лінії виробництва ШРКП: 1 – вугільний бункер; 2 – живильник-дозатор; 3 – дробарка; 4 – диспергатор; 5 – змішувач; 6 – кавітатор; 7 – буферний бак; 8 – бак готового ШРКП; А – вугілля; В – вода; С – технологічні домішки**

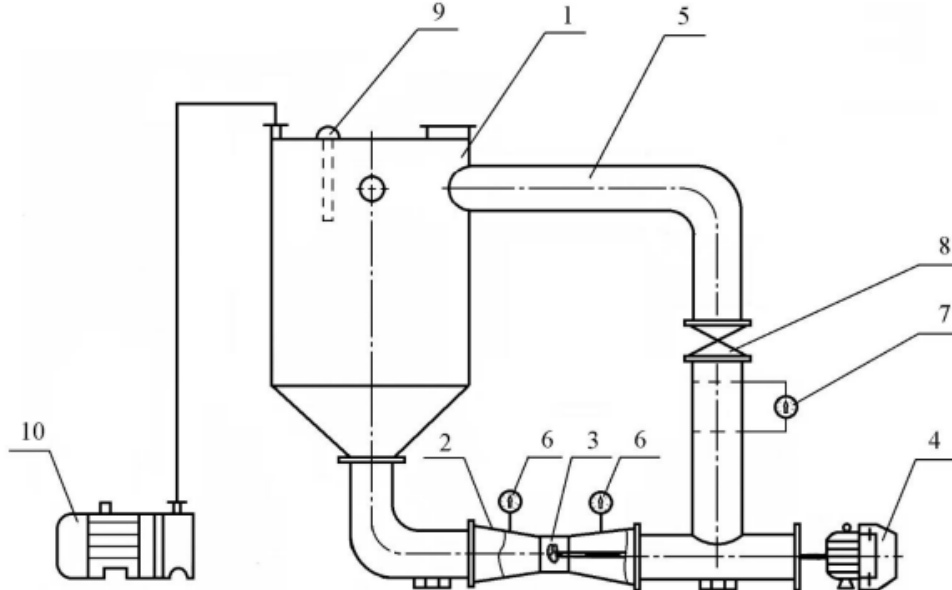
Особливістю установки є вузол кавітаційного диспергування, який являє собою встановлену на валу крильчатку для створення кавітаційного впливу та одночасного транспортування потоку. Таке рішення дозволяє регулювати розміри і щільність кавітаційних каверн при різній продуктивності, створюючи більш інтенсивний вплив кавітації в порівнянні зі статичними кавітаторами. Однак, з іншого боку, виникає необхідність застосування стійкіших до кавітаційного впливу матеріалів внаслідок підвищеного абразивного зносу крильчатки та робочої області.

Кавітаційна обробка сприяє деструкції молекул вугілля, що розпадається на окремі органічні складові з активною поверхнею частинок та високою кількістю вільних органічних радикалів частинок розміром 5-10 мкм. В результаті кавітаційного впливу вода також зазнає змін – у ній утворюються атомарний водень, перекис водню  $H_2O_2$  тощо [10]. Гідродинамічна кавітаційна обробка на стадії підготовки ВВП не лише механічно руйнує вугілля, а й змінює хімічний склад поверхневих шарів вугільних частинок за рахунок реакції окислення-гідролізу у воді. Це спричиняє зниження в'язкості та підвищення стабільності готової паливної суспензії, призводить до зміни динаміки горіння ВВП та додаткового зниження викиди в 1,6 разів, а в 1,3 рази. Кавітаційний спосіб отримання ВВП покращує реологічні та седиментаційні властивості цільового палива, знижує шкідливі викиди при горінні, впливає на параметри горіння [11]. застосування гідродинамічного

генератора для мокрого розмелу вугілля дозволяє підвищити дисперсність і забезпечити гомогенність ВВС, збільшити їх хімічну активність, що в результаті дало можливість отримати високо-реактивні ВВП із концентрацією вугілля близько 60-70 % [12].

На основі аналізу існуючих кавітаційних технологій в ІТТФ НАНУ запропоновано принципово новий кавітаційний реактор для проведення операції мокрого розмелу на другій стадії готування тонко дисперсних ВВС.

Апарати цього типу відрізняються високою зносостійкістю, що дозволяє обробляти грубодисперсні рідинні суміші з твердими частинками, незалежно від їх форми, розміру та абразивних властивостей. [13, 14]. Останнім часом модифікація цих апаратів спрямована на ініціювання в них кавітаційних явищ для підвищення ступеня диспергування та прискорення внутрішніх процесів. В рамках цього напрямку за участю авторів створено принципово новий тип кавітаційний пульсаційний апарат, в якому завдяки незначній, на перший погляд, зміні в конструкції ініціюється більш широкий комплекс кавітаційних механізмів, що дозволяє обробляти сировину із широким спектром структурно механічних і реологічних характеристик при порівняно невеликих питомих витратах енергії [15]. Новизна конструкції у порівняннях з традиційними пульсаційними апаратами полягає в тому, що в каналі рідинного тракту вміщено сопло Вентурі заданої геометрії.



**Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – ємність; 2 – вимірювальна труба; 3 – кавітатор; 4 – електродвигун; 5 – трубопровід рециркуляції; 6 – мановакуумметри; 7 – вимірювач швидкості потоку (витратомір); 8 – вентиль; 9 – термомпара; 10 – вакуумний насос**

На рис. 3 наведено принципову схему та загальний вигляд 2-мембранного кавітаційного пульсаційного диспергатора з соплом Вентурі. Апарат складається із завантажувальної ємності 7 з ВВС, яка знаходиться під атмосферним тиском; робочої камери з еліптичними боковими поверхнями 4; прямої труби 5, що з'єднує камеру 4 з ємністю 7. На ділянці труби 5 вміщено профільоване сопло Вентурі 6. Всередині камери 4 розміщено дві круглі гнучкі мембрани, які розділяють рідинний та газовий тракти апарата. за допомогою швидкодіючого е/м клапана 3 камера 4 у відповідності до заданої програми періодично з'єднується з ресивером низького тиску (РНТ) 1, або з ресивером високого тиску (РВТ) 2. Величина тиску в РВТ підтримується компресором, а величина тиску в РНТ – вакуумним насосом. Принцип роботи апарата полягає в наступному.

Ємність 7 завантажують у заданому співвідношенні суміш попередньо роздрібненого вугілля з водою. На початку роботи рідинна суміш через трубу 5 заповнює увесь об'єм камери 4, так що мембрани перекривають отвори, що з'єднують камеру з ресиверами. При з'єднанні камери з РВТ суміш під дією мембран виштовхується з камери 4 в ємність 7 через трубу 5 з соплом 6. Внаслідок швидкого інерційного руху вниз по трубі 5 рідина відривається від поверхні мембран із створенням глибокого вакууму над поверхнею стовпа рідини. Різка зміна тиску в об'ємі суміші в трубі прискорює масоперенос екстрагента всередині капілярної структури частинок сировини з можливим руйнуванням дисперсної фази і вилученням компонентів з клітин сировини. В ємності 7 під дією потужного струменя з труби відбувається інтенсивне турбулентне перемішування. завдяки різниці тиску рідина в трубі швидко гальмується, змінює напря-

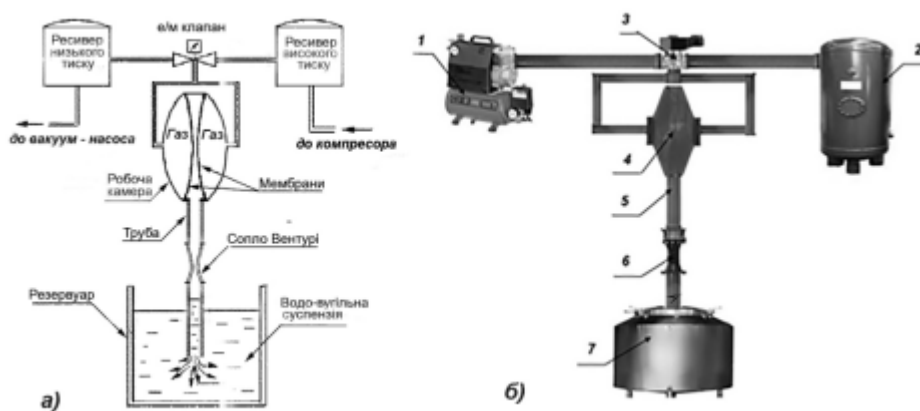
мок руху та зворотній, входить в камеру і притискається до поверхні мембран. На цій стадії камера 4 через клапан підключається до РНТ і мембрани швидко розходяться, перекриваючи отвори до ресиверів. При цьому відбувається різке гальмування потоку на бокових еліптичних поверхнях камери завдяки чому створюються потужні ефекти гідродару всередині камери і в трубі [13, 14]. На цій стадії камера знову підключається до РВТ, на чому завершується черговий цикл роботи пульсатора. за період одного циклу в рідинному тракті апарата ініціюється сукупність потужних механізмів, таких як кавітаційні ефекти всередині сопла, гідравлічний удар, дія зсувних напружень та інтенсивна турбулізація суміші.

Основним недоліком всіх технологій і обладнання для приготування ВВП є те, що кінцевий продукт придатне для спалювання в певному типі печах, котлах або двигунах. Виходом з такої ситуації є створення універсального водовугільного палива (УВВП), придатного для всіх типів енергетичних установок.

Вимоги до універсального водовугільного палива:

1. Це паливо має бути універсальним, тобто придатне до застосування на будь-якій енергетичній установці, що пов'язано в основному з граничним розміром частинок та їх середнім розміром. Наприклад, для безпечної та довготривалої роботи газових турбін обумовлюється граничний розмір частинок, який не повинен перевищувати 30 мкм. Для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) вимоги до граничного розміру частинок ще на порядок вищі – не більше 3 мкм.

2. Паливо має бути екологічно чистим, щоб не тільки при його виробництві не виникали додаткові проблеми з утилізацією шкідливих відходів виробництва,



**Рис. 3. Принципова схема (а) та загальний вигляд (б) кавітаційного пульсаційного диспергатора:**

**1 – ресивер низького тиску; 2 – ресивер високого тиску; 3 – електромагнітний клапан;**

**4 – робоча камера з мембранами; 5 – труба; 6 – сопло Вентурі; 7 – завантажувальна ємність з суспензією**

але також при спалюванні палива не виникало додаткове екологічне навантаження на природу та людину.

3. Зазначене паливо має тривалий час зберігати свій гомогенний стан, що дозволяє його попередньо накопичувати, наприклад, на період пікових навантажень. Експлуатація більш продуктивного обладнання для цього населеного пункту при цьому малорентабельна або збиткова через його тривалі простой поза опалювальним сезоном.

4. Собівартість отримання УВВП має бути такою, щоб його отримання на місці було економічно доцільним та не вимагало додаткових енергетичних потужностей, необхідних для виробництва палива.

5. Застосування УВВП не повинно негативно позначатися на ресурсі енергетичних установок та викликати появу будь-яких дефектів, наприклад, нагарів, прогарів тощо та двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ).

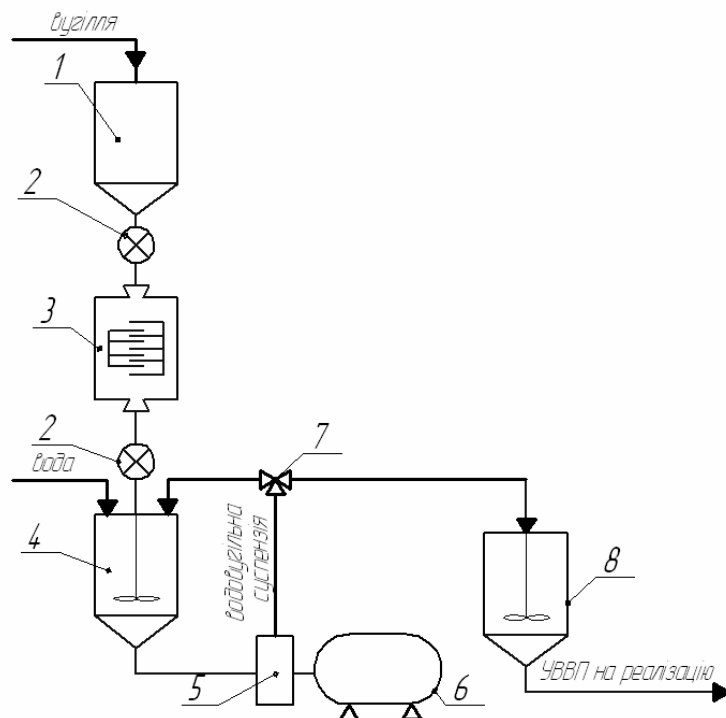
Для приготування УВВП в ІТТФ НАН України розроблена дослідно-промислова тепломасообмінна установка роторного типу, що працює по методу ДІВЕ. Реалізація методу ДІВЕ в роторно-пульсаційних апаратах припускає створення великої кількості рівномірно розподілених у дисперсному середовищі робочих органів або робочих елементів, які трансформують стаціонарну теплову, механічну або інші види

енергії в енергетично потужні імпульси, дискретні у часі і просторі. Супроводжуючі ці явища ударні хвилі, міжфазна турбулентність, кавітація, проникаючі кумулятивні мікрострумені, вихри викликають на міжфазних поверхнях нестійкості типу Релея-Тейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до інтенсивного подрібнення дисперсних включень, значному підвищенню сумарного контакту фаз та інтенсифікації процесів тепломасоперенесення.

Перераховані вище явища і механізми впливу на водовугільну суспензію дозволяє отримати УВВП з діаметром частинок не більше 3 мкм. Апаратурно-технологічна схема приготування УВВП представлена на рис. 4, зовнішній вигляд тепломасообмінної установки на рис. 5 та вузли і деталі на рис. 6 [16].

Приготування УВВП здійснюється наступним чином. Після дезінтегратора вугілля з розміром частинок не більше 500 мкм надходить в ємність для сировини 2 (рис. 4). В приймальну ємність 1 заливається вода. Відсоткове співвідношення вода:вугілля відповідає 30:70. Після цього вмикається РПА 4, який одночасно є відцентровим насосом, і вода циркулює по контуру: приймальна ємність 1 – РПА 4 – приймальна ємність 1.

Під час рециркуляції вмикають вібродозатор 3 і потік води надходить подрібнене вугілля з ємності 2.



**Рис. 4. Апаратурно-технологічна схема виготовлення універсального водовугільного палива:**

**1 – збірник вугілля; 2 – дозатор; 3 – дезінтегратор; 4 – приймальний збірник РПА; 5 – РПА; 6 – електродвигун; 7 – триходовий кран; 8 – збірник готової продукції**

Водовугільна суміш проходить через РПА і продовжує циркулювати по контуру, піддаючись при цьому впливу, що були описані вище.

Експериментально встановлено, що через 10-12 циклів обробки 100 % частинок мають середній

діаметр не більше 3 мкм. Таке водовугільне паливо може бути універсальним і застосовуватись для спалювання у всіх типах енергетичних установок [17].

У таблиці 2 наведені порівняльні характеристики різних змішувачів та РПА.

Табл. 1. Параметри водовугільного палива [3]

| Тип змішувача                | Продуктивність, м <sup>3</sup> /год. | Питома металоемність, кг•год./м <sup>3</sup> | Питомі енерговитрати, кВт•год./м <sup>3</sup> | Максимальний діаметр частинок d <sub>max</sub> , мкм |
|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Швидкохідні вертикальні      | 0,3-0,38                             | 1,5                                          | 18-24                                         | 150                                                  |
| Гідродинамічні ультразвукові | 0,8                                  | 0,1                                          | 3-12                                          | 70                                                   |
| Апарати вихрового шару       | 2,0-6,0                              | 0,15                                         | 0,6-1,8                                       | 30                                                   |
| Кавітаційні динамічні        | 0,6                                  | 0,1-0,15                                     | 6-19                                          | 25                                                   |
| Суперкавітуючі динамічні     | 20                                   | 0,1-0,15                                     | 0,275                                         | 15                                                   |
| Турбулентні статичні         | 1,8-2,25                             | 0,01-0,04                                    | 1,3-5,6                                       | 60                                                   |
| Суперкавітуючі статичні      | 20-120                               | 0,01                                         | 0,12                                          | 15                                                   |
| РПА                          | 11                                   | 0,01                                         | 0,1                                           | 3                                                    |



Рис. 5. Зовнішній вигляд тепломасообмінної установки: 1 – приймальний бункер; 2 – смонтована для сировини; 3 – вібродозатор; 4 – РПА; 5 – електродвигун

### Висновки

При проведенні аналізу існуючих технологій та обладнання для приготування водовугільного палива показано ефективність кавітаційного впливу. Встановлено, що перед кавітаційною обробкою вугілля необхідно диспергувати на різному виді подрібнюючого обладнання до середнього діаметра частинок 1000-500 мкм. Найбільш ефективно здійснювати кавітаційну обробку водовугільної суспензії з застосуванням тепломасообмінного обладнання, що працює по принципу ДІВЕ. Це дає можливість отримати універсальне водовугільне паливо з розміром частинок не більше 3 мкм, що придатне для спалювання в різних енергетичних пристроях, а також знизити питомі енерговитрати в порівнянні з суперкавітуючими майже в 3 рази.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Ходаков Г.С.* Водугольные суспензии в энергетике. Теплоэнергетика. 2007. № 1. С. 35-45.
2. *Макаров А.С., Янко С.В.* Проблемы использования высококонцентрированного водугольного топлива на основе углей Украины. Уголь Украины. 1992. № 3. С. 3-5.
3. *Параметри водовугілля.* Національний стандарт Китаю. Режим доступу: <https://www.docin.com/p-54578543.html>.
4. *Водовугільне паливо.* Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D1%83%D0%B3%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B5\\_%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D1%83%D0%B3%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B5_%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE).



*а*



*б*



*в*



*г*

**Рис. 6.** Вузли і деталі тепломасообмінної установки: *а* – проточний водонагрівач з контролером регулювання температури, *б* – зовнішній вигляд роторно-пульсаційного вузла, *в* – ємність для сировини з вібродозатором, *г* – зовнішній вигляд РПА підшипникового та сальникового вузлів

5. Халатов А.А., Костенко Н.В., Шіхабутінова О.В. Водовугільне паливо в енергетиці України. Сучасний стан і проблеми розвитку / Вісник Академії митної служби України. Сер.: Технічні науки. 2009. № 2. С. 33-43.
6. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія. Тернопіль, (видавництво Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя). 2009. 224 с.
7. Ивченко В.М. Кавитационная технология / В.М. Ивченко, В.А. Кулагин, А.Ф. Немчин // Под ред. акад. Г.В. Логвиновича. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. 200 с.
8. Овчинников Ю.В., Ноздренко Г.В., Шинников П.А. и др. Способ производства жидкого композитного топлива. Патент на изобретение RU № 2151959. 08.06.1999.
9. Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование / Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2003. т. XLVII, № 2. С. 33-44.
10. Морозов А.Г., Коренюгина Н.В. Гидроударные технологии для получения водоугольного топлива. Новости теплоснабжения. 2010. №7. С. 18-21.
11. Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Minakov A.V., Vshivkova O.A. Impact of Hydrodynamic cavitation on the properties of coal-water fuel: An experimental study. ACS Omega 2022, 7 (42). 37369-37378. DOI: 10.1021/acsomega.2c03979.
12. Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Дектерев А.А., Кузнецов В.А. Обзор работ по приготовлению водоугольного топлива и его сжиганию в котлах // Горение и плазмохимия. 19. 2021. 265-277. DOI: 10.18321/crc464.
13. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. Киев: Наукова думка, 2001. 345 с. ISBN 966-00-0815-5.
14. Иваницкий Г.К., Корчинский А.А., Матюшкин М.В. Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа. Промышленная теплотехника. 2003. № 1. С. 29-34.
15. Целень Б.Я., Радченко Н.Л., Гоженко Л.П., Иваницкий Г.К. Кавітаційний реактор пульсаційного типу для інтенсифікації процесів екстрагування Міжнародна науково-практичної on-line конференція “Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві” (11-12 листопада 2020 р.). – Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 201-202. Режим доступу: <http://www.kntu.kr.ua/?view=science&id=6>.
16. Патент на винахід UA 127427 Спосіб одержання рідкого композиційного палива 16.08.2023, бюл. № 33.
17. Ободович О., Целень Б., Степанова О., Недбайло. А., Булій Ю. (2024). Технологія та обладнання для одержання універсального водовугільного палива. Енерготехнології та ресурсозбереження, 78(1), 24-33. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.02>.
18. Ободович О.М., Горобець В.Г., Сидоренко В.В., Чернявський К.Є., Степанова О.Є. (2023). Спосіб отримання водовугільної суспензії та тепломасообмінне обладнання для його застосування. Енергетика та автоматика. № 4. С. 31-44. DOI 10.31548/energiya4(68).2023.031.

# CAVITATION TECHNOLOGIES AND NEW HEAT AND MASS EXCHANGE EQUIPMENT – A PROSPECTIVE DIRECTION FOR THE PREPARATION OF HYDROCARBON FUEL

Obodovych O.M.<sup>1</sup>, Tselen B. Y.<sup>2</sup>, Pereiaslavl'tseva O.O.<sup>3</sup>, Stepanova O.E.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dr. Sci. (Engin.), Professor, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, [orcid.org/0000-0001-7213-3118](https://orcid.org/0000-0001-7213-3118), e-mail: [tdsittf@ukr.net](mailto:tdsittf@ukr.net)

<sup>2</sup>PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, [orcid.org/0000-0001-5213-0219](https://orcid.org/0000-0001-5213-0219), e-mail: [b0d@ukr.net](mailto:b0d@ukr.net)

<sup>3</sup>PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: [alena\\_p11@ukr.net](mailto:alena_p11@ukr.net)

<sup>4</sup>PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, [orcid.org/0000-0002-7179-7251](https://orcid.org/0000-0002-7179-7251), e-mail: [super-olesya2807@ukr.net](mailto:super-olesya2807@ukr.net)

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.10>

Considering that the import of oil and gas is decreasing, the cost of their production and supply is increasing, coal in Ukraine is becoming almost the only source of energy of local origin. In order to overcome the critical situation in the fuel and energy complex of the country, trends have been outlined regarding the development and implementation of energy saving programs, as well as the creation and implementation of new, efficient, environmentally friendly fuel technologies. One of the main ones is the transition to widespread use of hydrocarbon fuel (HCF).

The purpose of the work is the analysis of existing technologies and equipment for the preparation of hydrocarbon fuel. Demonstration of the effectiveness of the cavitation effect on the water-coal mixture. To propose new technologies and heat and mass exchange equipment working on the basis of the DPIE method as a promising direction in the preparation of HCF.

When conducting an analysis of existing technologies and equipment for the preparation of hydrocarbon fuel, the effectiveness of the cavitation effect is shown. It was

established that before cavitation treatment, coal must be dispersed on various types of grinding equipment to an average particle diameter of 1000-500 microns. It is most effective to carry out cavitation treatment of hydrocarbon suspension with the use of heat and mass exchange equipment operating on the DPIE principle. This makes it possible to obtain a universal hydrocarbon fuel with a particle size of no more than 3 microns, which is suitable for burning in various energy devices, as well as to reduce specific energy consumption by almost 3 times compared to supercavitating fuels.

References 15, figures 6, tables 2.

**Key words:** hydrocarbon fuel, discrete-pulse energy input, cavitation, rotary-pulsation devices, heat and mass exchange equipment.

1. Khodakov G.S. (2007). Vodougol'nyye suspenzii v energetike [Coal-water suspensions in the energy sector]. *Teploenergetika*. № 1. 35-45. (in Rus.)

2. Makarov A.S., Yanko S.V. (1992). Problemy ispol'zovaniya vysokokontsentririvannogo vodougol'nogo topliva na osnove ugley Ukrainy [Problems of using highly concentrated coal-water fuel based on Ukrainian coals]. *Ugol' Ukrainy*. № 3. 3-5. (in Rus.)

3. *Coal parameters*. National standard of China. Available at: <https://www.docin.com/p-54578543.html>.

4. *Hydrocarbon fuel*. Available at: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D1%83%D0%B3%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B5\\_%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D1%83%D0%B3%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B5_%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE). (in Ukr.)

5. Khalatov A.A., Kostenko N.V., SHikhabut'ina O.V. (2009). Vodovuhil'ne palyvo v enerhetytsi Ukrayiny. Suchasnyy stan i problemy rozvytku [Hydrocarbon fuel in the energy sector of Ukraine. Current state and problems of development]. *Visnyk Akademiyy mytnoyi sluzhby Ukrayiny*. Ser.: Tekhnichni nauky. № 2. 33-43. (in Ukr.)

6. Viten'ko T.M. (2009). Hidrodynamichna kavitatsiya u masoobminnykh, khimichnykh i biolohichnykh protsesakh [Hydrodynamic cavitation in mass exchange, chemical and biological processes]: monohrafiya. Ternopil', (vydavnytstvo Ternopil's'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu imeni Ivana Pulyuya). 224 p. (in Ukr.)

7. Ivchenko V.M., Kulagin V.A., Nemchin A.F. (1990). Kavitatsionnaya tekhnologiya [Cavitation technology]. Pod red. akad. G.V. Logvinovicha. Krasnoyarsk: Izd-vo KGU. 200 p. (in Rus.)

8. Ovchinnikov YU.V., Nozdrenko G.V., Shinnikov P.A. i dr. (2007). Sposob proizvodstva zhidkogo kompozitnogo topliva [Method for producing liquid composite fuel]. Patent for invention RU № 2151959. published 08.06.1999. (in Rus.)

9. Khodakov G.S. (2003). Reologiya suspenziy. Teoriya fazovogo techeniya i yeye eksperimental'noye obosnovaniye [Rheology of suspensions. The theory of phase flow and its experimental substantiation]. Ros. khim. zh. (ZH. Ros. khim. ob-va im. D.I. Mendeleyeva). v. XLVII, № 2. 33-44. (in Rus.)
10. Morozov A.G., Korenyugina N.V. (2010). Gidroudarnyye tekhnologii dlya polucheniya vodougol'nogo topliva. Novosti teplosnabzheniya [Hydroimpact technologies for producing coal-water fuel. Heating news]. № 7. 18-21. (in Rus.)
11. Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Minakov A.V., Vshivkova O.A. (2022). Impact of Hydrodynamic cavitation on the properties of coal-water fuel: An experimental study. ACS Omega 2022, 7 (42). 37369-37378. DOI: 10.1021/acsomega.2c03979.
12. Alekseyenko S.V., Mal'tsev L.I., Kravchenko I.V., Dekterev A.A., Kuznetsov V.A. (2021). Obzor rabot po prigotovleniyu vodougol'nogo topliva i yego szhiganiyu v kotlakh [Review of work on the preparation of coal-water fuel and its combustion in boilers]. Gorenije i plazmokhimiya. 19. 265-277. DOI: 10.18321/cpc464. (in Rus.)
13. Nakorchevskiy A.I., Basok B.I. (2001). Gidrodinamika i teplomassoperenos v geterogennykh sistemakh i pul'siruyushchikh potokakh [Hydrodynamics and heat and mass transfer in heterogeneous systems and pulsating flows]. Kyiv: Naukova dumka, 2001. 345 c. ISBN 966-00-0815-5. (in Rus.)
14. Ivanitskiy G.K., Korchinskiy A.A., Matyushkin M.V. (2003). Matematicheskoye modelirovaniye protsessov v pul'satsionnom dispergatore udarnogo tipa [Mathematical modeling of processes in a pulsating shock-type dispersant]. Promyshlennaya teplotekhnika. 2003. № 1. С. 29-34. (in Rus.)
15. Tselen B.YA., Radchenko N.L., Hozhenko L.P., Ivanyts'kyi H.K. (2020). Kavitatsiynyy reaktor pul'satsiynoho typu dlya intensyfikatsiyi protsesiv ekstraktsiyi [Pulsation-type cavitation reactor for intensification of extraction processes]. Mizhnarodna naukovo-praktychnoyi on-line konferentsiya "Problemy enerhoefektyvnosti ta avtomatyzatsiyi v promyslovosti ta sil's'komu hospodarstvi" (11-12.11.2020 р.). – Кривий Ріг: ТSNТУ, 2020. С. 201-202. Режим доступу: <http://www.kntu.kr.ua/?view=science&id=6>. (in Ukr.)
16. Dolins'kyi A.A., Khalatov A.A., Shikhabutina O.V., Obodovych O.M., Sydorenko V.V. Sposib oderzhannya ridkoho kompozytsiynoho palyva [The method of obtaining liquid composite fuel] Patent of Ukraine for the invention № 127427 C10L 1/00. C10L 1/32. B02C 9/00; declared 05.07.2021; published 16.08.2023, № 33. (in Ukr.)
17. Obodovych O., Tselen B., Stepanova O., Nedbaylo A., Buliy YU. (2024). Tekhnolohiyata obladnannya dlya oderzhannya universal'nogo vodovuhil'nogo palyva [Technology and equipment for the production of universal hydrocarbon fuel]. Enerhotekhnolohiyi ta resursozberezhennya, 78(1), 24-33. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.02>. (in Ukr.)
18. Obodovych O.M., Horobets V.H., Sydorenko V.V., Chernyavs'kyi K.YE., Stepanova O.YE. (2023). Sposib otrymannya vodovuhil'noyi suspenziyi ta teplomasoobminne obladnannya dlya yoho zastosuvannya [The method of obtaining water-coal suspension and heat and mass exchange equipment for its application]. Enerhetyka ta avtomatyka. № 4. 31-44. DOI 10.31548/energiya4(68).2023.031. (in Ukr.)

Отримано 02.05.2024

Received 02.05.2024

Прийнято до друку 17.08.2024  
Accepted for publication 17.08.2024