

УДК 662.61: 532.584: 662.66

А. А. Халатов, чл.-кор. НАНУ, д-р. техн. наук;  
О. В. Шіхабутінова, канд. техн. наук; Ю. В. Моніч, студ.

## АНАЛІЗ ТА ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

*Наведено короткий огляд можливостей використання водовугільного палива. Подано технології приготування водовугільної суміші, разом з тим наведено опис кавітаційно-вихрового методу отримання водовугільного палива. Розглянуто основні властивості ВВП, особливості його виробництва та застосування. Проаналізовано проблеми і сформульовано пропозиції подальших перспектив використання ВВП в енергетиці України.*

### Вступ

Загострення ситуації в паливно-енергетичному комплексі України через підвищення вартості імпортного природного газу зумовлює необхідність розширення сфери використання власних енергоносіїв, основним з яких є вугілля.

Однак підвищення ролі вугілля в теплоенергетиці і збільшення обсягів його застосування пов'язані з погіршенням екологічної ситуації особливо в промислово розвинених регіонах, а саме підвищення викидів твердих частинок і оксидів азоту під час термічної сушки, забруднення повітряного простору і водойм від численних шламонакопичувачів тощо. Одним із шляхів вирішення цих екологічних проблем є використання водовугільного палива (ВВП).

Ідея використання ВВП замість нафтопродуктів отримала активне розповсюдження на початку 70-х років минулого століття за часів світової нафтової кризи в колишньому СРСР, Китаї, Японії, Швеції, США та інших країнах [1].

На сьогодні найбільшого поширення отримали роботи з ВВП в Китаї та Японії. Сьогодні тематикою ВВП в Китаї займаються три дослідницькі центри, створено Державний центр водоугільних технологій. Якщо в 2001 р. у Китаї щорічно вироблялося і споживалося більше 2 млн тонн ВВП, то в 2006 р. — вже близько 15 млн тонн, а до 2020 р. виробництво ВВП в Китаї планується довести до 100 млн тонн на рік. Японія ж профінансувала будівництво заводу водовугільного палива на території Китаю і вже багато років транспортує ВВП океанськими танкерами на свої підприємства по всьому узбережжю Японії [2].

Активно в сфері екологічних та енергозбережних технологій працюють і в Новосибірську, де крім класичної сировини використовують торф'яний гідрогель і відходи вуглезбагачення.

В Україні з використанням водовугільного палива тільки для пусків енергоблоків замість газу чи мазуту можна заощадити близько 10 млн м<sup>3</sup> природного газу на 2000 пусків енергоблоків. Але повернення до «вугільної ери» неможливо на основі технологій 50–60 років минулого століття, що зумовлено безліччю економічних і екологічних показників.

### Особливості ВВП

Водовугільне паливо — це дисперсна система «вода—тонко дисперсне вугілля—хімічні добавки», що містить 60 ... 70 % подрібненого вугілля розміром 45 ... 250 мкм, 30 ... 40 % води і 1 % поверхнево-активних речовин (ПАР), що вводяться для підвищення реакційної здатності системи «рідина—тверда фаза». ВВП отримують з вугілля різних марок: антрациту, кам'яного та бурого вугілля різної зольності, води будь-якої якості, а також високозольних відходів збагачення.

Особливістю ВВП є низькі температури займання 450 ... 650 °С, горіння — 950 ... 1050 °С і висока ступінь вигорання палива — до 99,5 %. Сприятливі для горіння умови істотно знижують в продуктах згорання вміст оксидів азоту (до 1,5 ... 2 раз), вуглецю (у 2 рази) і бензопірену (в 5 разів).

Найважливішими характеристиками ВВП з точки зору його зберігання, транспортування та спалювання є його реологічні властивості — динамічна в'язкість і стабільність. За однакових теплоти згорання, зольності, мінералогічному складі, початковій вологості і однакових затратах на приготування якості водовугільного палива характеризується його реологічними властивостями — динамічною в'язкістю та стабільністю.

Особливість реологічних властивостей проявляється в мінливому характері динамічної в'язкості ВВП, яка залежить від напруги зсуву і швидкості руху рідини. Такий рух ВВП є неньютонівським і визначається складом дисперсної фази і дисперсного середовища [3].

Практично всім ВВП, підготовлених з різних марок вугілля, властиві екстремальні залежності в'язкості від складу, змісту тонкої фракції і хімічних добавок. Прагнення до створення ВВП з максимальним вмістом твердої фази (вугілля) призводить до різкого збільшення його динамічної в'язкості (рис. 1).

В'язкість ВВП можна зменшити введенням хімічних реагентів, поверхнево-активних речовин (ПАР), за оптимального поєднання дисперсантів і стабілізаторів, а також підбором гранулометричного складу вугільних частинок.

Зниження динамічної в'язкості ВВП за рахунок використання ПАР — досить вартісний захід, оскільки вартість пар практично дорівнює вартості вихідної сировини (вугілля).

Стабільність ВВП — одна з найважливіших характеристик палива через його зберігання, транспортування та спалювання. Однак, якщо ВВП використовується на місці виготовлення або близько до нього, то цей показник не має принципового значення.

Як повідомляється в [1], в Інституті фізико-органічної хімії та вуглехімії НАН України розроблені нові технології отримання ПАР, сировиною для яких служить буре вугілля. Запаси бурого вугілля в Україні значні. Основною перевагою розроблених ПАР є висока ефективність регулювальної дії, абсолютна термостійкість, проста технологія та низька вартість.

Забезпечення стабільності ВВП можливе за рахунок підбору гранулометричного складу при тонкому диспергуванні, яке супроводжується збільшенням зовнішніх і внутрішніх поверхонь внаслідок розблокування пор і розвитку нової пористості з виникненням мікротріщин. Об'єм мікропроміжних пор збільшується в декілька разів, тобто має місце кардинальне перетворення вихідної пористої структури. Структурні зміни зумовлюють зміну властивостей багатьох матеріалів, в тому числі вугілля. Відбуваються глибокі зрушення тонкої структури вугільної речовини. При цьому підвищується реакційна здатність вугілля в різних процесах і хімічних реакціях.

Висока хімічна активність вугілля разом з окисленням і тенденцією до загоряння пояснюється утворенням вільних радикалів в результаті розриву зв'язків С—С.

Зміни щільності тонкодисперсного вугілля від 1,59 до 1,39 г/см<sup>3</sup> підтверджують ослаблення структури внаслідок руйнування хімічних зв'язків та перебудови структури макромолекули вугілля. Отримання тонкодисперсного активованого з розвиненою поверхнею вугілля дає широкі можливості для використання цього процесу в різних енергетичних технологіях: для займання та стабільного згоряння пиловугільного полум'я в енергетичних котлах, заміни паливної нафти в промислових котлах.

### Технологія отримання водовугільного палива

Для промислового виробництва ВВП в Китаї та інших країнах широко використовується російська технологія розробки 70-х років минулого століття, яка включає двостадійний «мокрый» помел вугілля, коли в одному млині здійснюється грубо дисперсний, а в іншому — високодисперсний помел вугілля. Процес приготування палива завершується у змішувачі. Двостадійний помел певною мірою оптимізує гранулометричний склад водовугільної суміші і робить позитивний вплив на динамічну в'язкість ВВП [1].

Основними промисловими апаратами виробництва ВВП за традиційною технологією є кулькові й стрижневі млини «мокрого» помелу.

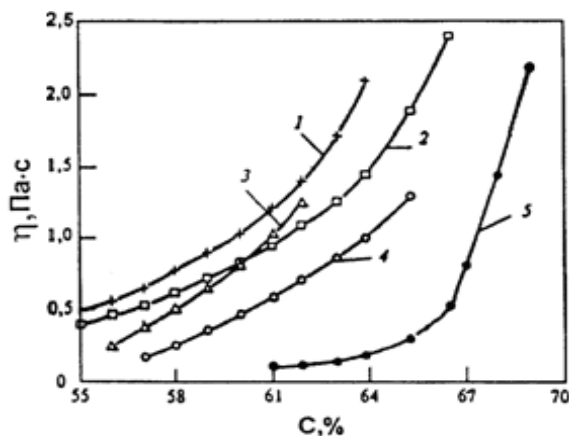


Рис. 1. Залежність ефективної в'язкості водовугільного палива  $\eta$  від змісту дрібнодисперсного вугілля шахти «Інська» (Кузбас, Росія):  
1...3 — зольність вугілля 13,5 %:  
1 — одностадійна технологія без гомогенізації;  
2 — двостадійний без гомогенізації; 3 — двостадійна з гомогенізацією; 4 — збагачення вугілля до зольності 7 %, двостадійна технологія з гомогенізацією;  
5 — зі збагаченого вугілля оптимального бімодального гранулометричного складу

Основна причина великої витрати енергії зумовлена досить низьким (менше 1 %) енергетичним ККД кулькових млинів. Стрижневі млини мають дещо кращі енергетичні характеристики. У процесі приготування однієї тонни ВВП випаровується близько 15 кг води, що з продуктивністю млина 3 т/год становить більше однієї тонни води на добу. Тому, щоб не допустити конденсації пари в приміщенні, млин доводиться обладнати паровідвідною системою. Іншим недоліком традиційної технології є значний механічний і корозійний знос поверхні молотильних тіл (400...1000 г на тонну продукції), який, залежно від марки сталі, в 3...5 разів перевищує аналогічні характеристики у разі сухого подрібнення вугілля. В цілому, виробництво водовугільного палива в Китаї за традиційною технологією характеризується досить високою вартістю – близько 25 дол. США за тонну водовугільного палива [3].

У Новосибірському державному технічному університеті розроблено штучне композитне рідке паливо, для виробництва якого використана кавітаційна технологія обробки вугілля [4]. Для виробництва ВВП використовується подрібнене до 2,0 мм вугілля, яке далі додатково додрібнюється в диспергаторі ультратонкого подрібнення до стану із середнім розміром частинок близько 30 мікрон. Після цього вугільний порошок змішується з водою і технологічними добавками і надходить в кавітатор, де відбувається доробка паливної композиції, яка сприяє деструкції молекул вугілля з розпадом на окремі органічні складові з активною поверхнею частинок і великою кількістю вільних органічних радикалів часток розміром 5...10 мікрон. Внаслідок дії кавітатора вода також зазнає зміни – в ній утворюється атомарний водень, перекис водню  $H_2O_2$ , вода в збудженому стані й інші компоненти, хімічна активність яких сприяє утворенню активного дисперсного середовища, насиченого компонентами іонного та катіонного типів. Одержуване паливо характеризується підвищеною реакційною здатністю і може зберігатися без руйнування фізико-хімічної структури більше 12 місяців.

«Мокра» обробка водовугільного палива в кавітаційних апаратах виявилася надзвичайно плідним напрямком і привела до створення низки нових технологій виробництва ВВП.

Кавітаційне водовугільне паливо (КавВП) не вимагає використання хімічних реагентів і зберігає стабільність протягом 8...24 місяців. Це паливо має велику реакційну здатність, високий ступінь вигорання (до 99 %), а активація поверхневих часток призводить до істотного зниження температури займання. У сумі витрати на спорудження установки з приготування КавВП та додаткових вузлів складає 3,55 дол. США на тонну продукції на рік, що майже в 3 рази менше витрат на спорудження традиційної схеми вугільної паливоподачі з пилеприготуванням [3].

Обґрунтування концепції суміщених турбулентного вихрового потоку і акустичного самозбудженого поля з різночастотними параметрами для інтенсифікації подрібнення стало основою створення вихрових установок мікронного і субмікронного диспергування твердих матеріалів з високим рівнем процесів тепломасообміну. На цій основі розроблені нові вихрові пристрої для тонкого диспергування різних матеріалів з урахуванням їх теплофізичних, фізико-хімічних і технологічних властивостей.

З використанням вихрових пристроїв мікронного диспергування в Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено спосіб отримання водовугільного палива на основі кавітаційно-вихрової технології. Технологія отримання ВВП основана на двоступеневому подрібненні вугілля: «сухе» подрібнення вугілля від 2...3 мм до 10...20 мкм здійснюється у вихровій камері, а змішування і додрібнення до 6...10 мкм – в кавітаційному апараті. Поєднання акустичних коливань певної частоти з вихровим газовим потоком дозволяє отримувати дисперсні системи із заданим розміром частинок. Джерелом акустичних коливань є самозбуджені коливання, що виникають під час обтікання резонаторів і вихрової камери потоком аеродинамічних профільованих елементів. Застосування кавітаційно-вихрового методу дозволило отримати стабільну водовугільну суспензію без ПАР з концентрацією вугілля до 60 % і необхідними реологічними властивостями (рис. 2).

Запропонований спосіб отримання ВВП характеризується високою активацією і демінералізацією палива, що значно підвищує енергетичний потенціал водоугільного палива і його екологічну чистоту; відносно низькою собівартістю за рахунок використання вихрового млина та кавітаційного диспергатора; відсутністю диспергуючих добавок і дорогих ПАВ.

Однак треба враховувати, що у всіх цих випадках необхідна значна модернізація теплоагрегатів, яка може окупитися за 2–3 роки, і тільки в особливо сприятливих випадках окуп-

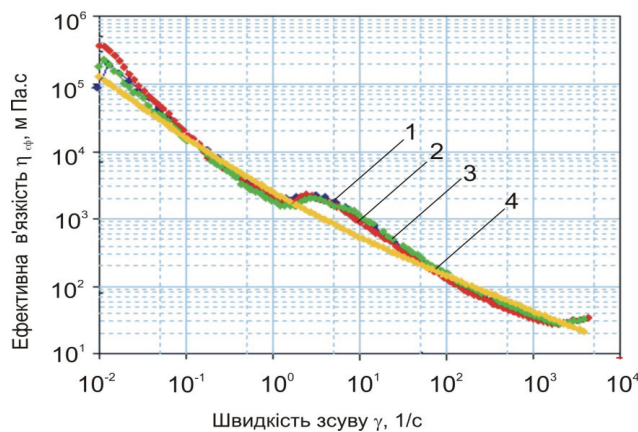


Рис. 2. Залежності ефективної в'язкості  $\eta_{\text{еб}}$  від швидкості зсуву  $\bar{\gamma}$ : 1 — вода і 50 % АШ; 2 — вода і 55 % АШ; 3 — вода і 60 % АШ; 4 — за допомогою апроксимації отриманих даних моделлю Гершеля-Балклі

альтернативного джерела енергії дозволяє значно розширити галузі використання вугілля. Технології приготування ВВП та її основні закономірності глибоко вивчені і практично реалізовані в країнах, що використовують ВВП, і відрізняються в основному технікою та глибиною подрібнення, способом збереження необхідної в'язкості і стабільності. На основі фундаментальних досліджень в галузі вихрових потоків і аналізу сучасного обладнання отримання водовугільного палива встановлено, що для отримання ВВП доцільне використання двоступеневих апаратів, де на першій стадії здійснюється «сухе» подрібнення вугілля у вихровому потоці, а на другій — кавітаційне змішування і додрібнення, що дозволяє отримувати частки вугілля з середнім розміром 10 мкм.

Весь процес приготування ВВП — це процес боротьби з негативним впливом золи на всіх етапах приготування ВВП. Для України настав період осмислення даного процесу, тим більше що технологія і техніка для збагачення будь-якого вугілля в наш час вже існує і функціонує. Цей висновок однозначний для теплоенергетики будь-якого рівня і особливо актуальний для ВВП і його застосування в малій теплоенергетиці. Але найбільшою проблемою на шляху впровадження водовугільних технологій в теплоенергетиці України була і залишається повна відсутність цілеспрямованої державної політики, про що прямо свідчить «Енергетична стратегія України на період до 2030 року», в якій не передбачена цільова програма розвитку водовугільних проектів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Халатов А. А. Водовугільне паливо в енергетиці України. Сучасний стан і Проблеми розвитку / А. А. Халатов, Н. В. Костенко, О. В. Шіхабутінова // Вісник Академії митної служби України. Технічні науки. — 2009. — № 2 (42). — С. 33—43.
2. Літовкін В. В. Аналітичний огляд технологій і устаткування для виробництва водовугільного палива в Україні / В. В. Літовкін, А. В. Літовкін // Нові Виклики часу : зб. наук. праць. — Львів : НВФ «Українські Технології»; за ред. П. Омеляновського, Й. Мисака. — 2009. — С. 76—80.
3. Долинский А. А. Водоугольное топливо: Перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе / А. А. Долинский, А. А. Халатов // Промышленная теплотехника. — 2007. — т. 29, № 5. — С. 70—79.
4. Зайденварг В. Е. Производство и использование водоугольного топлива / [В. Е. Зайденварг, К. Н. Трубецкой, В. И. Мурко, И. Х. Нехороший]. — 2001. — 176 с.
5. Кузнецов А. С. К вопросу о внедрении водоугольного топлива (ВУТ) на промышленных и коммунальных теплоэнергетических предприятиях / А. С. Кузнецов, И. И. Токарев // Современная наука : сб. науч. стат. — 2010. — № 1(3). — С. 32—34.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики

Стаття надійшла до редакції 26.01.12  
Рекомендована до друку 31.01.12

**Халатов Артем Артемович** — завідувач; **Шіхабутінова Оксана Володимирівна** — старший науковий співробітник.

Відділ високотемпературної термогазодинаміки Інституту технічної теплофізики НАН України;

**Моніч Юлія Вікторівна** — студентка.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ