

## ЕКОЛОГІЧНІ ПЕРЕВАГИ ВОДОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

Изложены особенности технологии водоугольного топлива, обеспечивающие экологический эффект от его сжигания вследствие снижения содержания твёрдых частиц и токсичных газообразных веществ в атмосферных выбросах, а также использования в качестве исходного продукта угольных отходов обогащения из шламонакопителей.

## ECOLOGICAL ADVANTAGES OF COAL–WATER FUEL

Specific aspects of the coal-water fuel technology are discussed, which ensure an ecological effect of coal-water fuel combustion owing to a reduced particulate and toxic gaseous substances content of air emissions as well as the use of coal preparation waste from slurry ponds as the original product.

Енергетичний аспект розвитку світової економіки вимагає інтенсивного використання енергоресурсів, серед яких на теперішній час та у перспективі провідна роль належить вугіллю. Ця обставина висуває проблему забезпечення екологічної безпеки в умовах все більш жорстоких вимог до охорони навколишнього середовища.

В Україні найбільш екологічно несприятливим є Східний регіон і, зокрема, Донецька область, яка забезпечує 30 % промислового виробництва України і де сумарне техногенне навантаження на одиницю площі в 4 рази перевищує середнє по Україні, а на кожного мешканця припадає більше 100 т накопичених промислових відходів, у тому числі токсичних.

Основними джерелами забруднення атмосферного повітря є підприємства вугільної, енергогенеруючої та металургійної промисловості, якими наприкінці минулого століття по Донецькій області кожен рік в атмосферу викидалося біля 86 % всіх. викидів шкідливих речовин.

Природні ландшафти Донбасу у більшості випадків видозмінені через господарчу діяльність. Екологічний профіль його визначається наперед за все індустріальними ландшафтами з максимальною деградацією природних комплексів, великі площі зайняті териконами, кар'єрами, плоскими породовідвалами, золовідвалами, шламонакопичувачами, тощо.

Основними джерелами вироблення та складування відходів залишаються вугільна та вуглепереробна промисловість. Об'єм вугільних відходів у Донецькій області дорівнює 50 % від загальноукраїнського об'єму. Підприємства вугільної промисловості попри зниження загального об'єму виробництва, а також роботи, що проводяться по реструктуризації та закриттю шахт, створюють високе техногенне навантаження на території області, оскільки, ряд джерел забруднення навколишнього середовища залишаються екологічно небезпечними, незалежно від того працює або ні підприємство по основному виробництву.

Інтенсивно забруднюють атмосферу твердими частинками та токсинними газоподібними речовинами підприємства теплоенергетики. Накопичення в атмосфері оксидів сірки та азоту призводить до утворення кислотних дощів, які

погіршують стан лісів, підвищують кислотність ґрунтів та водоймищ. Серед газів, які сприяють інтенсивному утворенню тепличного ефекту 50 % складає  $\text{CO}_2$  та 10 %  $-\text{NO}_x$ .

Таким чином, з еколого-економічної точки зору господарчий профіль промисловорозвинених регіонів України і, зокрема, Донбас, характеризується домінуванням екологічно небезпечних виробництв та високою територіальною концентрацією.

Екологічна ситуація, тобто стан окремих компонентів природного середовища (повітряний басейн, вода, ґрунт, ландшафти), що змінюються під діями виробництва, не лише стає гальмом цього виробництва, але в значній мірі обумовлює підвищення навантажень на людський організм, безпосередньо впливаючи на здоров'я, самопочуття та психологічний стан людей.

Таким чином, найважливішим завданням та навіть економічною стратегією сьогодення стає розробка та впровадження науково обґрунтованих ресурсо-заощаджуючих технічних рішень та нових технологій, особливо в галузі теплоенергетики, в напрямку зниження кількості шкідливих викидів у навколишнє середовище, хоча б до гранично припустимих концентрацій, стабілізації та поліпшення екологічної ситуації в промислово-розвинених регіонах країни.

Одним з таких технічних рішень є впровадження у велику та малу теплоенергетику технології водовугільного палива, що характеризується високою ефективністю та екологічною чистотою спалювання.

За своїми фізико-механічними характеристиками ВВП подібно до рідкого в'язкого палива – мазута і може бути використаним у топках кам'яновугільних та газомазутних котлоагрегатів всіх типів та паропродуктивностей. Модифікація пиловугільних котлоагрегатів для переводу на спалювання водовугільного палива здійснюється з мінімальними витратами і, як правило, зберігає можливість роботи на традиційному паливі. В системі паливоподачі ВВП використовують трубопроводи мазутного господарства ТЕС. Майже не зазнають конструктивних змін пальники та форсунки.

Спалювання водовугільного палива має свої досить помітні особливості [1], найважливішою з яких є паралельне протікання процесів горіння частинок твердої фази з поверхні краплин палива та випарювання вологи палива, що вміщується в цих краплинах. Саме ця обставина обумовлює високу ефективність вигорання органічної маси палива, яку вміщено у краплинах, і як наслідок – можливість екологічно чистого спалювання.

У високотемпературному середовищі камери спалювання (до 1200 °С і вище) краплини водовугільного палива підсихають, поверхня частинок твердої фази, які розміщені поблизу зовнішньої поверхні краплин, оголюється. Надалі зона випарення вологи проникає в глибину краплини, а ті частинки, які підсохли, спікаються, утворюючи досить міцний пористий шар, з якого формується пористий агломерат розміром до 30 мкм, де зконцентровані всі зольні частинки ВВП. Ця обставина значно підвищує ефективність роботи сухих зололовлювачів і обумовлює викид твердих частинок з димовими газами не вище за

60-80 % від рівня гранично допустимих викидів.

Одночасно з випаренням зовнішньоповерхневої вологи краплини палива, при прогріванні до температури кипіння, в центрі її утворюється пароподібний мікрооб'єм, який збільшується по мірі прогрівання, і стає джерелом утворення сферичної порожнини зольного агломерата на завершальній стадії процесу горіння. Цей мікрооб'єм обумовлює міграцію твердих частинок та вологи до периферії краплини палива, що полегшує дифузію окислювача до частинок вугілля та інтенсифікує процес горіння в цілому.

Великий градієнт температур у шарі, який утворився з висохших частинок і має високий термічний опір, обумовлений його структурою, сприяє тому, що спалахнення частинок вугілля, активованого водяною парою, відбувається ще до завершення випарення вологи з краплини. Як свідчать експериментальні дані, до моменту спалахнення водовугільного палива на основі кам'яного вугілля з його об'єма встигає випаритись лише 30 % вологи.

Спалахнення та основні стадії горіння водовугільного палива протікають в умовах випарення вологи, яка міститься у об'ємі краплини, та масопереносу водяної пари через шар агломерованих частинок органічної та мінеральної частини палива, утвореного на поверхні краплини. Вже при температурах 400-600 °С контакт поверхні вугільної частинки з водяною парою призводить в результаті деструктивних процесів до активації цієї поверхні і як наслідок – різкого підвищення швидкості хімічних реакцій вугільної речовини з окислювачами.

Для розпиленого у потоці повітря водовугільного палива такими окислювачами є кисень повітря та водяна пара, яка в сумарному процесі горіння виконує роль проміжного окислювача. Водяна пара при високій концентрації є каталізатором для реакції горіння монооксиду вуглецю, що протікає безпосередньо біля поверхні краплини, і, таким чином, майже повністю виключає наявність цієї високотоксичної газоподібної речовини у газоподібних вогнищевих залишках.

При горінні краплини ВВП прогрівання вугільних частинок відбувається з меншою інтенсивністю ніж у випадку сухого вугілля внаслідок процесів випарення вологи та масопереносу водяної пари. Спалахнення краплин водовугільного палива починається не з продуктів деструкції (летких), а безпосередньо з гетерогенних реакцій активованих вугільних частинок на поверхні агломерованої краплини. Багатофакторний процес деструкції та горіння вугільних компонентів краплини ВВП, утруднений процесом випарення вологи, обумовлює високу повноту вигорання органіки палива, що складає 99,0-99,7 % для вугілля марки Г.

Оксиди сірки  $SO_2$  та  $SO_3$ , утворення яких є результатом окислення сірководневодородних компонентів палива, досить ефективно зв'язують оксиди лужноземельних та лужних металів ( $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ) а також їх сполучення, які, як правило, присутні у мінеральній складовій вугілля. Ефективність зв'язування підвищує введення в паливо цих оксидів у вигляді водних розчинів. Крім того сполучення лужноземельних та лужних металів присутні також у воді, яку використовують для виготовлення водовугільного палива.

Оксиди азота NO та у невеликій кількості NO<sub>2</sub> (у технічній літературі об'єднані символом NO<sub>x</sub>) утворюються при спалюванні палива за рахунок окислення азота повітря при високих температурах в зоні горіння (термічні оксиди азота) та за рахунок хімічних реакцій азотовміщуючих сполучень вугілля з киснем повітря та кисневміщуючих сполучень палива (паливні оксиди азота).

При спалюванні краплин водовугільного палива навколо них утворюється напіввідновлююче середовище зони вторинних реакцій. Попадаючи в цю зону, монооксиди азота, що утворилися в результаті горіння вугілля, отримують сприятливі умови для свого відновлення.

Практикою підтверджена можливість відновлення при температурах 800-900 °С монооксида азота монооксидом вуглецю  $2NO + 2CO = N_2 + 2CO_2$ . До подібного відновлення призводять також гетерогенні реакції з коксовим залишком  $NO + (\text{коксвий залишок}) \rightarrow N_2$ .

Зниження в зоні горіння температури на 100-200 °С у порівнянні з камерним спалюванням вугілля обумовлює чотирьох-шестикратне зниження утворення термічних оксидів азота. Промислові дослідження спалювання ВВП у потужних котлоагрегатах показали, що лише за рахунок перелічених факторів утворення оксидів азота складатиме лише 30-50 % у порівнянні із спалюванням вугільного пилу.

Майже півторакратне зниження утворення оксидів азота обумовлене дуже невеликим у процесі горіння водовугільного палива надміром повітря (3-7%). Відомі також технологічні заходи до зниження утворення оксидів азота при спалюванні рідкого та газоподібного палива шляхом рециркуляції продуктів спалювання, двох- та трьохступінчастого спалювання та ін.

Таким чином, особливості горіння водовугільного палива, а також застосування певних технологічних заходів суттєво знижують зміст твердих частинок і газоподібних шкідливих речовин в атмосферних викидах теплових електростанцій та інших промислових та побутових теплофікаційних установок у порівнянні із спалюванням вугільного пилу і особливо із шаровим спалюванням вугілля. Паралельний перебіг процесу горіння ВВП та утворення великої кількості водяної пари значно зменшує інтенсивність виділення летких продуктів термічної деструкції вугілля, практично виключає утворення сажі та інших аналогічних продуктів крекінгу летких, а також монооксиду вуглецю та легких вуглеводнів, які є джерелами канцерогенних сполук. Все це дає підставу вважати ВВП екологічно чистим паливом. Крім того на відміну від традиційних палив воно не токсичне та пожежо- і вибухобезпечне при транспортуванні та зберіганні.

У найбільшій мірі переваги водовугільного палива проявляють себе при використанні його як основного, штатного палива для спалювання у топках потужних енергетичних котлоагрегатів, що підтверджено даними експлуатації першого у світовій практиці повномасштабного дослідно-промислового теплоенергетичного комплексу „Белово-Новосибірськ” (Росія) та створеного з урахуванням досвіду його освоєння демонстраційного комплексу „Порто Торрес” (Італія) [2].

Вихідним продуктом такого палива має бути високоякісне малозольне вугілля з високим енергетичним потенціалом, а технологія виготовлення виявляється досить складною, що й обумовлює його високу собівартість. Крім того, переведення газомазутних котлів на спалювання водовугільного палива вимагає їх суттєвої модифікації і, в першу чергу, обладнання системи видалення вогнищевих залишків – золи та шлаку, що пов'язане з відповідними витратами. За цих обставин конкурентноздатним високоякісне ВВП може бути лише при використанні його як альтернативи природному газу та мазуту, що й обумовило його найбільше застосування у країнах, які, не маючи власних ресурсів нафти й природного газу, прагнуть позбавитись економічної залежності від постачальників. На теперішній час до таких країн в першу чергу належать Китай та Японія і має всі підстави належати Україна.

Чітку перспективу впровадження технології водовугільного палива має мала теплоенергетика, де тисячі котлів малої та середньої паропродуктивності, які забезпечують тепловою енергією промислові підприємства, учбові та лікувальні заклади, а також житлові масиви, відчувають гостру нестачу природного газу та мазуту. Велика частина котлів промислового та комунального призначення, які працюють на твердому паливі, обладнані малоефективними топками шарового спалювання, що зовсім не відповідає вимогам охорони навколишнього середовища.

Еколого-економічна ефективність переведення на водовугільне паливо котлів з топками шарового спалювання обумовлена, наперед за все, суттєвим підвищенням повноти вигорання органічної маси і, як наслідок, зниженням витрати палива на виробництво теплової енергії. Екологічний аспект такої технології ілюструють експериментальні дані проф. Г.Н. Делягіна (табл.1).

Таблиця 1 – Порівнювальний питомий викид забруднюючих речовин

Найменування речовини	Викид шкідливих речовин, г/МДж	
	Шарове спалювання	Спалювання ВВП
Зола (тверді частинки)	0,629	0,044
Діоксид сірки	1,438	0,104
Діоксид азоту	0,410	0,020
Оксид вуглецю	0,248	0,0304

Еколого-економічну ефективність переведення котла ДКВР 20-13 на спалювання водовугільного палива характеризують дані, наведені у табл.2, які підтверджують доцільність використання ВВП як основного (штатного) палива для котлів малої та середньої паропродуктивності з топками шарового спалювання вугілля. При цьому вимоги до якості водовугільного палива мають бути менш жорсткими, як по енергетичному потенціалу, так і в плані седиментаційної стабільності.

Таблиця 2 – Розрахунковий викид шкідливих речовин та відповідний екологічний збиток при роботі котла ДКВР 20-13 на шаровому спалюванні вугілля і факельному спалюванні ВВП на основі того ж вугілля (місцевий корегувальний коефіцієнт для умов Донбасу прийнято  $K_m = 2,25$ )

Найменування речовин	Питомий економічний збиток від забруднення довкілля, грн/т	Технологія спалювання			
		Шарове спалювання вугілля		Факельне спалювання ВВП	
		Забруднення, т/рік	Збиток, грн/рік	Забруднення т/рік	Збиток, грн/рік
Тверді частинки (зола)	2,0	107,9	215,0	15,1	30,2
Діоксид сірки SO <sub>2</sub>	53,0	247,0	13091,52	17,8	943,4
Діоксид азоту NO <sub>2</sub>	53,0	70,3	3726,0	3,4	180,2
Монооксид вуглецю CO	2,0	42,5	85,1	0,51	1,02
Сумарний приведений збиток, грн..			38515		2598
Зниження збитку 38 515 – 2 598 = 35 917 грн/рік					

Загальний економічний та еколого-економічний річний ефект від переведення котла ДКВР 20-13 на спалювання водовугільного палива складатиме більше 1,5 млн. грн.

Останнім часом у світовій практиці спостерігають підвищену зацікавленість можливістю утилізації в теплоенергетиці вугільних шламів – відходів вуглезбагачення, яка обумовлена єдністю підвищених екологічних вимог (для промислово розвинених країн з власними ресурсами енергоносіїв) і необхідності пошуку додаткових дешевих енергоносіїв (для країн, які відчувають їх дефіцит в умовах інтенсивного розвитку економіки).

Численні шламонакопичувачі, які є об'єктами потенціальної екологічної загрози, на той же час можуть бути додатковим джерелом дешевих енергоносіїв. Враховуючи підвищену вологість вугільних шламів (біля 20 %), най-більш раціональним шляхом їх утилізації є використання у вигляді водо-вугільного палива зниженої концентрації для сумісного спалювання з основним паливом більш високої реактивності і енергетичного потенціалу з метою підвищення повноти вигорання органічної маси та зниження у атмосферних викидах твердих частинок і газоподібних шкідливих речовин (у західній літературі технологія “co-firing”).

Доцільність використання водовугільного палива, виготовленого на основі вугільних шламів, як допалювального палива для керування викидами оксидів азоту було підтверджено дослідженнями фахівців США [4], проведеними на пиловугільному енергетичному котлі потужністю 170 МВт з подальшим перерахуванням на котел потужністю 500 МВт з коефіцієнтом продуктивності 75 %. У процесі досліджень було розглянуто чотири варіанти: базовий варіант без

допалювання, допалювання з використанням природного газу, допалювання з використанням вугільного пилу і допалювання з використанням водовугільного палива. У економічних розрахунках вартість ефект-роенергії на власні потреби була прийнята \$0,03/Гкал, вартість природного газу – \$8,33/Гкал, вартість вугілля – \$3,97/Гкал, вартість шламу з шламо-накопичувачів – \$2,98/Гкал. Результати економічного аналізу (табл.3) свідчать про економічну доцільність використання ВВП як допалювального палива у енергетичних котлоагрегатах.

Технологію використання ВВП на основі вугільних шламів як основного палива у топках з киплячим шаром було досліджено китайськими фахівцями ще на початку 80-х років минулого століття [5]. На дослідній установці киплячого шару потужністю 0,5 МВт було використано гідросуміш подрібненого до крупності дрібного (<2 мм) вугілля зольністю 18,3% з концентрацією 70–75% , а також водовугільна суспензія на основі шламів збагачувальної фабрики при зольності 40,6–51,6 %. Для зіставлення у топку разом з гідросумішами подавали сухе вугілля.

Таблиця 3 – Зведення загальних витрат на допалювання

Допалювальне паливо	Газ	Вугільний пил	ВВП
Загальні капіталовкладення, \$млн.	8,8	17,4	10,2
Річні експлуатаційні витрати*, \$млн.	14,3	3,4	0,99
Річне зниження викидів NO <sub>x</sub> , т/рік	15 965	15 078	15 078
Вартість зниження викидів, \$/т	896	225	66

\* – Річні експлуатаційні витрати показані у припущенні перевищення експлуатаційних витрат базового варіанта.

Випробування показали, що при завантаженні певної кількості сухого вугілля разом з гідросумішкою повнота вигорання складала 80 %, на той час як у випадку суспензії ця величина сягала 95%. Це підвищення на 15% повноти вигорання органічної маси палива значно перевищує приховані втрати теплоти (біля 1,6 %), які витрачено на випарення додаткової вологи.

Аналіз результатів досліджень свідчить також про зниження викидів оксидів азоту на 25–40 % та утримання сірки внаслідок додавання вапняку до гідросуміші безпосередньо перед спалюванням до 80% при мольному співвідношенні Ca/S = 2.

Таким чином, видобування та утилізація вугільних шламів з шламонакопичувачів або безпосередньо з технологічних схем збагачувальних фабрик може дати суттєві економічні та екологічні вигоди. Використання цих паливних ресурсів призводить до зменшення кількості та виключає необхідність організації нових шламонакопичувачів, суттєво покращує екологічний фон у регіонах зосередження підприємств паливно-енергетичної галузі. Площі, які займають шламонакопичувачі, будуть звільнені для більш корисного вико-

ристання.

Виробники електричної та теплової енергії отримують водовугільний паливо-товарний продукт, менше підвладний до коливання ринкових цін на енергоносії, завдяки некоштовній сировині, що може відіграти певну роль у стабілізації паливно-енергетичного балансу країни.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Делягин Г.Н. Водугольное топливо – экологически чистое топливо // Трубопро-водный гидротранспорт твёрдых материалов.–К.–1993.–книга . 2.–с. 299-323.
2. Grinzi F. Coal Water Mixture Combustion and Boiler Retrofit // Seminar “Member State Technologies dedicated to Help the Energy Self Sufficiency Process optimising the local Resources such as Coal”.–К.–1997.–P.1 – 20.
3. Ashworth Robert A., Maly Peter M. Results of CWS Reburn Tests on a 10 x 106 Btu/hr Tower Furnace and Its Impact on CWS Reburn Economics// The Proceedings of the 22-nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems.–March, 1997.– Clearwater, Florida, USA.– P.789 – 800.
4. Morrison Donald K., Melick Todd A., Ashworth Robert A. et al. Coal-Water Slurry Reburning for NOx Emission Control // The Proceedings of the 20-th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems .– 1995.– March.–Clearwater, Florida, USA.–P.47 – 58.
5. Yan Jianhua et al. A Low Emission Technology – Low Cost Water Mixture Fired Fluidized Bed Combustion//The Proceedings of the 20th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems.– March, 1995.– Clearwater, Florida, USA.–P.749 –756.
6. Battista Joseph., et al/ Utility Applications for Coal\_Water Slurry Co-firing// The Proceedings of the 20th International Conference on Coal Utilization & Fuel Systems.–March. 1995.–Clearwater, Florida, USA.–P. 523 –534.
7. Ashworth Robert A., Maly Peter M. Results of CWS Reburn Tests on a 10 x 106 Btu/hr Tower Furnace and Its Impact on CWS Reburn Economics// The Proceedings of the 22-nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems.–March, 1997.– Clearwater, Florida, USA.– P.789 – 800.