

УДК 621.311

В.С. КОБЕРНИК

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

ОЦІНКА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БУРОГО ВУГІЛЛЯ НА ТЕС УКРАЇНИ

Проведено техніко-економічні розрахунки і порівняння енергоблоків ТЕС, що спалюють кам'яне і буре вугілля за різними технологіями і забезпечують досягнення сучасних норм викидів основних забруднюючих речовин. Проаналізовано вплив виду палива на середню вартість електричної енергії за життєвий цикл при впровадженні нових технологій перетворення енергії на ТЕС.

Ключові слова: теплова електрична станція, надкритичні параметри пари, буре вугілля, вартість електричної енергії.

Розвиток теплової генерації має визначатися наявністю та вартістю запасів власного вугілля та природного газу, а також розвитком енергетичних технологій використання альтернативних видів палива. Перевага віддаватиметься найбільш ефективним рішенням. Важливим напрямком реконструкції енергетичного сектора з урахуванням нестачі антрациту стає диверсифікація споживаних марок вугілля.

Українські енергетики шукають нові шляхи підвищення ефективності виробництва. Паралельно з підвищенням ККД розробляються нові способи економії палива. В Україні багато ТЕС орієнтовані на споживання імпортного природного газу, залежність від якого енергетики знижують, спалюючи пиловугільне паливо. В якості можливого палива можна використовувати буре вугілля, запаси якого в Україні дуже значні. Його розвідані запаси в Україні оцінюють до 2,5 млрд т, вони займають ¼ частину території України. У 1990 р. в Україні видобувалось 3,6 млн т бурого вугілля, до 2010 р. цей показник впав практично до нуля. Тепер необхідно відроджувати буровугільну галузь.

Виходячи з наведеного вище, метою цієї статті є визначення перспективи використання бурого вугілля на ТЕС. Для цього необхідно провести порівняння техніко-економічних показників енергоблоків ТЕС, що спалюють кам'яне і буре вугілля за різними технологіями і забезпечують досягнення сучасних норм викидів основних забруднюючих речовин згідно Директиви 2010/75/EU.

© В.С. КОБЕРНИК, 2018

Буре вугілля як дешевий енергетичний ресурс розглядається у якості альтернативи більш дорогому вугіллю інших груп у східноєвропейських країнах. Низька ціна бурого вугілля пов'язана з близькістю залягання до поверхні землі, його можна видобувати відкритим способом. Ціни на сировину залежать від таких параметрів як розмір фракції, температура згоряння, вміст сірки, зольність та інших, але буре вугілля різних регіонів має одну спільну рису – високий вміст вологи, яка може досягати 60%. Схоже за характеристиками буре вугілля має різну вартість в залежності від країни (табл. 1).

Компанії, що видобувають буре вугілля в Україні, орієнтуються поки що на експорт. Західним покупцям економічно вигідно власне буре вугілля розбавляти українським і цю суміш поставляти енергетикам. Наприклад, для Словаччини ввозити буре вугілля з України приблизно втричі дешевше, ніж із Чехії. Серед потенційних покупців – Індія та Китай, їхня потреба в цьому ресурсі зростає щорічно. Переговори щодо розробки родовищ веде китайська China Coal Engineering Corporation.

Порівняння енергоблоків ТЕС, що спалюють кам'яне і буре вугілля.

З огляду на міжнародний досвід прямого спалювання кам'яного і бурого вугілля з фільтрацією димових газів і уловлюванням CO₂, розглянемо економічну доцільність їх використання на ТЕС.

Витрати перспективних екологічних енергоблоків на твердому паливі за технологією факельного спалювання вугільного пилу, що задовольняють вимогам Директиви 2010/75/EU (IED) (гранично допустимі викиди (мг/м³) не повинні перевищувати: пилу 20; NO_x – 200; SO₂

Таблиця 1 – Характеристики і вартість бурого вугілля у європейських країнах [1]

Країна	Вологість, %	Зольність, %	Теплота згоряння, МДж/кг	Вартість бурого вугілля (з ПДВ), євро/т
Словаччина	13–38	8,5–37	10,5–15,8	82–108
Угорщина	26–32	15–17	12,14–20,1	65–102
Румунія	24–46	10,3–22	13,2–18,6	43–64
Чехія	26–28	9,5–33	11,5–20	47–89
Польща	47	6,28	12,83	45
Україна	55	7,9	8,6–12	18–25

– 200), надано в [2] за даними фірми Євроелектрик (табл. 2).

Розглянемо наступні варіанти проектів нових вугільних енергоблоків:

1) надкритичного тиску пари (НКТ) з факельним спалюванням кам'яного вугілля з сіркоочисткою (СО) і азотоочисткою (АО) – вартість вугілля за формулою «Роттердам +»;

2) надкритичного тиску пари з факельним спалюванням бурого вугілля з сіркоочисткою і азотоочисткою;

3) ультранадкритичного тиску пари (УНКТ) з факельним спалюванням кам'яного вугілля з сіркоочисткою, азотоочисткою та уловлюванням і зберіганням CO_2 – вартість кам'яного вугілля за формулою «Роттердам +»;

4) надкритичного тиску пари з факельним спалюванням кам'яного вугілля з сіркоочисткою (СО) і азотоочисткою (АО) – вартість кам'яного вугілля без формули;

5) ультранадкритичного тиску з факельним спалюванням кам'яного вугілля з сіркоочисткою, азотоочисткою та уловлюванням і зберіганням CO_2 – вартість кам'яного вугілля без формули.

Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) рекомендує проводити порівняльні техніко-економічні розрахунки за середньою собівартістю виробленої за життєвий цикл енергії, що забезпечує самоокупність джерела виробництва за весь цикл існування. Введено показник LCOE, що враховує всі витрати за життєвий цикл: початкові інвестиції, витрати паливні, на утримання і ремонт обладнання та інші.

Порівняльні техніко-економічні розрахунки за середньою вартістю електричної енергії за життєвий цикл (LCOE) проводили з використанням вихідних даних з табл. 2, а також таких даних: кількість годин використання встановленої потужності – 6600 год/рік; термін роботи енергоблоку – 30 років; термін будівництва енергоблоку – 2 роки; вартість кам'яного вугілля – 1570 грн./т н.п. (за формулою «Роттердам +» 63 дол./т н.п. [3]); вартість українського кам'яного вугілля – 1100 грн./т н.п. (без формули 44,2 дол./т н.п. [3]); вартість бурого вугілля – 750 грн./т н.п. [4]; нижча робоча теплота згоряння кам'яного вугілля – 21,16 кДж/кг (5057 ккал/кг); нижча робоча теплота згоряння бурого вугілля – 11,51 кДж/кг (2750 ккал/кг) [5];

Таблиця 2 – Характеристики енергоблоків, що спалюють вугілля [2]

Показник	НКТ – кам'яне вугілля	НКТ – буре вугілля	УНКТ* – кам'яне вугілля
Електрична потужність, МВт	760	760	760
ККД, %	54	43	39
Вартість проекту, дол./кВт	1952	2102	3464
Інвестиційні витрати, дол./кВт	2489	2680	4380
Витрати на виведення з експлуатації, дол./кВт	0,02	0,02	0,03
Витрати на паливо, дол./МВт·год	28,8	13,63	33,23
Витрати на видалення CO_2 , дол./МВт·год	23,59	25,37	2,72
Витрати на експлуатацію, дол./МВт·год	5,11	5,51	8,66
Нормована вартість електроенергії, дол./МВт·год	90,11	79,61	102

* УНКТ з уловлюванням і зберіганням CO_2

заробітна плата [6]; дисконтна ставка – 0,10; курс валют – 25 грн./дол. США. Частка умовно-постійних витрат, пов'язаних з експлуатацією і ремонтами порівнювальних проєктів, визначалася на основі аналізу структури вартості виробництва електричної енергії на ТЕС генеруючих компаній України за даними НКРЕКП України і приймалася у розмірі 20% від виробничої вартості.

Порівняльні техніко-економічні розрахунки для білоруських ТЕЦ, що спалюють буре вугілля і природний газ, були проведені за критерієм мінімуму приведених витрат [7], а не за рекомендаціями МЕА, які враховують витрати за життєвий цикл. Було показано, що за білоруськими цінами економічно більш вигідно спалювати буре вугілля, ніж газ.

Для проведення розрахунків будівництва нових енергоблоків на теплових електростанціях було використано програмно-інформаційний комплекс порівняльної оцінки вартості електричної енергії за життєвий цикл при спалюванні органічного палива в енергетичних установках, розроблений в ІЗЕ НАН України. Економічні показники енергоблоків включають питомі витрати: інвестиційні, експлуатаційні, паливні на 1 МВт·год виробленої електроенергії. Результати співставлення середньої зваженої ціни електричної енергії за життєвий цикл від енергоблоків 760 МВт з встановленим обладнанням сіркоочищення та азотоочищення, що спалюють кам'яне і буре вугілля, з урахуванням витрат на видалення CO₂ та без урахування цих витрат, представлено в табл. 3.

Наведені результати розрахунків свідчать про те, що з урахуванням витрат на уловлювання CO₂ як при вартості кам'яного вугілля за формулою «Роттердам +», так і без формули найбіль-

ша середня зважена вартість електричної енергії за життєвий цикл має місце для енергоблоку ультранадкритичного тиску з факельним спалюванням кам'яного вугілля з сіркоочисткою, азотоочисткою. Найнижча середня зважена вартість електричної енергії за життєвий цикл має місце для енергоблоку надкритичного тиску пари з факельним спалюванням кам'яного вугілля з сіркоочисткою і азотоочисткою. Середня зважена вартість електричної енергії за життєвий цикл для енергоблоку НКТ з факельним спалюванням бурого вугілля з сіркоочисткою і азотоочисткою на 9–11% вища, ніж для енергоблоку НКТ при спалюванні кам'яного вугілля.

Найбільша середня зважена вартість електричної енергії за життєвий цикл має місце для енергоблоку НКТ з факельним спалюванням бурого вугілля з сіркоочисткою, азотоочисткою. Пояснюється це високою вологістю (55%) і низькою теплою згоряння українського бурого вугілля (8,6–11,5 МДж/кг). На даний час через високу собівартість електричної енергії за життєвий цикл будівництво нових установок для спалювання бурого вугілля поки що не є економічно доцільним для енергетики України, хоча є значні поклади такого вугілля. Найнижча середня зважена вартість електричної енергії за життєвий цикл має місце для енергоблоку НКТ з факельним спалюванням кам'яного вугілля з сіркоочисткою і азотоочисткою.

Українське буре вугілля має високу вологість і сірчистість, через що не може спалюватися в існуючих котлах ТЕС, ТЕЦ і котельних, а потребує спеціальних технологій термічної переробки. Найменш витратним є переведення з газомазутного на тверде паливо котлів, які спочатку були спроектовані для його спалювання. Переведення котлів, які спочатку були спроектовані як газомаз-

Таблиця 3 – Витрати за життєвий цикл і вартість електроенергії

Показник	НКТ – кам'яне вугілля (Роттердам+)	НКТ – буре вугілля	УНКТ – кам'яне вугілля (Роттердам+)	НКТ – кам'яне вугілля	УНКТ – кам'яне вугілля
Витрати на паливо, дол./МВт·год	19,83	21,81	27,46	14,16	19,61
Витрати на CO ₂ , дол./МВт·год	23,59	25,37	33,23	23,59	33,23
Витрати на експлуатацію, дол./МВт·год	4,96	5,45	6,86	3,54	4,90
Нормована вартість електроенергії, дол./МВт·год	49,52	54,18	70,36	42,44	60,55
Нормована вартість електроенергії без витрат на CO ₂ , дол./МВт·год	25,93	28,81	37,13	18,85	27,32

зутні, на спалювання твердого палива без суттєвої реконструкції неможливо.

Харківське ЦКБ «Енергопрогрес» розробило проект котла Е-260-13,8-560, що спалює вугілля за технологією циркулюючого киплячого шару (ЦКШ) для бурого вугілля українських родовищ [8]. При цьому для вугілля з високою вологістю необхідно передбачити попередню сушку палива. При відсутності попередньої сушки конструкція котла буде відрізнятися від запропонованої. Залежно від якості вугілля котел буде комплектуватися різними системами для підготовки палива.

Розрахункові параметри котла [8]:

паропроодуктивність – 260 т/год.

температура перегрітої пари – 560 °С

тиск перегрітої пари – 13,8 МПа

температура живильної води – 230 °С

надлишок повітря – 15%

середня температура киплячого шару – 845 °С

температура вихідних газів – 149 °С

зв'язування сірки – 90%

ККД (за нижчою теплотворною здатністю) – 91%

Регульовальний діапазон роботи котла:

– без підсвічування – 30–100%

– з підтримкою номінальних параметрів пари – 60–100%.

Для покращення якісних характеристик буровугільного палива Хайдуровою А.А. запропоновано його сушіння перед спалюванням за допомогою мікрохвильової енергії. Проведено порівняльні розрахунки теплових витрат на сушку вологого бурого вугілля в сушильних конвективних і мікрохвильових установках. Теоретичний тепловий розрахунок енергетичних витрат на сушку 1 т бурого вугілля з вихідною вологістю 30% до кінцевої вологості 10% показав, що для випаровування 20% вологи необхідно витратити 169,7 кВт·год/т, а для процесу сушіння бурого вугілля в млині-вентиляторі – 240 кВт·год/т. З урахуванням стадії дроблення вугілля до фракції $d < 40$ мм загальна витрата енергії щодо підготовки бурого вугілля для спалювання становить 241,4 кВт·год/т у разі сушіння без обдування і 160,8 кВт·год/т – з обдуванням. Обсяг капітальних вкладень у мікрохвильову установку потужністю 1 т/год. вугілля складає 2735 дол. [9]. Встановлено, що після мікрохвильової сушки при видаленні вологи відбувається повне видалення азоту і зниження вмісту сірки в бурому вугіллі. Показано, що використання мікрохвильових установок на ТЕС для дроблення і сушіння бурого вугілля технологічно доцільно і економічно вигідно для отримання якісного

палива, спрямованого на зниження енерговитрат, поліпшення якості кінцевого продукту і екологічних показників. Невисока собівартість сушіння і дроблення вугілля гарантує швидку окупність капітальних вкладень.

ВИСНОВКИ

1. На основі розрахунків середньої собівартості виробленої електричної енергії за життєвий цикл за методикою МЕА (за умов виконання норм ЄС, які забезпечують досягнення сучасних норм викидів основних забруднюючих речовин) найбільш економічно доцільними з урахуванням характеристик українського кам'яного і бурого вугілля та їх вартості для використання на ТЕС можна вважати пиловугільні енергоблоки надкритичного тиску пари з факельним спалюванням кам'яного вугілля з сіркоочисткою і азотоочисткою.

2. Використання бурого вугілля на ТЕС рекомендується після впровадження на них установок дроблення і сушіння для покращення його якості (наприклад мікрохвильових).

1. Цена бурого угля и характеристики для европейского производства. URL: <http://www.eic.in.ua/European-prices-brown-coal>.
2. Projected Costs of Generating Electricity. Nuclear energy agency. International energy agency. 2010. 203 p.
3. Ціна українського вугілля за формулою «Роттердам+». URL: <http://ua-energy.org/post/61012>.
4. Вартість бурого вугілля. URL: <http://www.ua-tenders.com/offer/105613/>.
5. Технические характеристики бурого угля. URL: <http://eic.in.ua/sites/default/files/TXBU.pdf>.
6. Динаміка середньомісячної заробітної плати за видами економічної діяльності промисловості у 2010–2017 роках. К.: Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/>.
7. Куксов А.С., Нагорнов В.Н. Методические подходы к оценке экономической целесообразности энергетического использования белорусских бурых углей. Актуальные проблемы энергетики. Материалы 65-й СНТК. Минск, 2013. С. 471–474. URL: <http://www.bntu.by/images/stories/ef/SCIENCE/65-7.pdf>.
8. Эффективные направления технического перевооружения угольных энергоблоков 200–300 МВт. Харьковское ЦКБ «Енергопрогрес», 2012. 29 с. URL: http://www.niss.gov.ua/public/File/2012_table/Pr10_25_12_2012.pdf.
9. Хайдурова А.А. Улучшение качественных характеристик твердого топлива воздействием микро-волновой энергии при его подготовке к сжиганию: автореф. дис. ... канд. техн. наук, спец. 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Улан-Уде, 2010. 20 с.

Надійшла до редколегії 31.10.2018 р.