

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА ТЕС З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ НА ВИКИДИ ШКІДЛИВИХ ЕМІТЕНТІВ

*Проведено порівняння впровадження в теплову енергетику України перспективних проєктів реконструкції і нового будівництва вугільних енергоблоків ТЕС за різними технологіями, що забезпечують досягнення сучасних норм викидів основних забруднювачів атмосферного повітря від потужних спалювальних установок згідно з вимогами Директиви Європейського парламенту та Ради 2001/80/ЄС. Показано, що нове будівництво вугільних енергоблоків за технологією спалювання у циркулюючому киплячому шарі на надкритичний тиск (НКТ) є рівноеконімічним з проведенням реконструкції існуючих енергоблоків НКТ з встановленням найбільш ефективного обладнання сіркоочищення і азотоочищення. Однак в умовах ринкової конкуренції забезпечення інвестиційної привабливості проєктів будівництва нових енергоблоків і впровадження природоохоронних технологій високої ефективності на ТЕС потребує кратного збільшення податку на викиди основних забруднювачів від рівнів, встановлених згідно з Податковим кодексом України. При цьому середній рівень ринкової ціни реалізації електричної енергії від ТЕС зросте на 32–42%.*

*Ключові слова:* вугільна електростанція, очищення викидів, вартість електричної енергії.

Стратегією розвитку енергетики України передбачено зростання частки вугільної генерації на ТЕС. Теплові електростанції України є основними забруднювачами оточуючого середовища. Екологічну обстановку поблизу ТЕС погіршує використання застарілого газоочисного обладнання (очистка від золи 90%, очистка від SO<sub>2</sub> і NO<sub>x</sub> не передбачена). Для покращення екологічної ситуації необхідно підвищити ККД паротурбінних енергоблоків і вирішити проблеми в галузі чистих вугільних технологій.

Останнім часом актуальність вирішення екологічних проблем ТЕС значно загострилась у зв'язку з приєднанням України до Договору про заснування Енергетичного співтовариства, ратифікованого Законом України від 15.12.2010 № 2787. Цей договір зобов'язує сторони до 31 грудня 2017 року виконати вимоги Директиви Європейського парламенту та Ради 2001/80/ЄС «Про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин в атмосферу з великих спалювальних установок». До котельних агрегатів, номінальна потужність яких дорівнює

© С.В. ДУБОВСЬКИЙ, В.С. КОБЕРНИК, 2014

або перевищує 50 МВт, пред'являються нові, більш жорсткі вимоги, пов'язані з забезпеченням допустимих викидів в атмосферу продуктів згоряння твердого, рідкого і газоподібного палива.

Об'єднана енергетична система України містить значну кількість енергоблоків застарілих конструкцій, що не підлягають реконструкції, а потребують заміни на більш сучасні. У зв'язку з цим окрім реконструкції існуючих необхідне будівництво нових генеруючих потужностей, що здійснюватиметься з використанням сучасного обладнання очищення димових газів, котлів та енергоблоків більш досконалих конструкцій. Нові потужності, які впроваджуватимуться замість старих енергетичних блоків, що відпрацювали свій ресурс, повинні задовольняти вимоги Директиви 2001/80/ЄС.

Необхідність формування екологічно чистої вугільної енергетики визначає нову концепцію конденсаційних пилувугільних енергоблоків. Більша ефективність нових енергоблоків досягається за рахунок переходу на підвищені параметри пари, а зменшення викидів забруднюючих речовин забезпечується установками гли-

бокого очищення димових газів.

Перспективним чистим вугільним технологіям та можливостям їх впровадження в енергетику України присвячено багато робіт Інституту вугільних енерготехнологій НАН України, наприклад, [9, 10]. Але у цих роботах відсутні кількісні техніко-економічні розрахунки вартості електричної енергії при впровадженні нових технологій.

У попередній роботі [1] авторами були проведені порівняльні техніко-економічні оцінки впровадження перспективних природоохоронних технологій теплової енергетики України у процесі реконструкції існуючих енергоблоків ТЕС. Мета даної роботи полягає у розширенні варіантів порівняння актуальних проектів будівництва нових генеруючих потужностей, що задовольняють екологічні вимоги Директиви 2001/80/ЄС.

Для порівняння вибрано проекти реконструкції існуючих пилувугільних енергоблоків потужністю 300 МВт зі збільшенням потужності до 325 МВт з встановленням обладнання сіркоочищення та азотоочищення і без нього (встановлений лише досконалий електрофільтр – базовий варіант № 1).

Проектні характеристики нових енергоблоків приймалися за даними [2–5]. Розглянуто такі проекти нових пилувугільних енергоблоків:

- надкритичного тиску пари (НКТ) з факельним спалюванням вугільного пилу з сіркоочисткою (СО) і азотоочисткою (АО);
- суперкритичних параметрів пари (СКП) з факельним спалюванням з сіркоочисткою (СО) і азотоочисткою (АО);
- НКТ із спалюванням вугілля у циркулюючому киплячому шарі (ЦКШ) без додаткового очищення димових газів.

Характеристики проектів і діючих вугільних енергоблоків наведені у табл. 1. Вихідні дані базового проекту вибрано за результатами реконструкції енергоблока ст. № 1 Запорізької ТЕС у 2012 році, у ході якої було виконано великий комплекс робіт: модернізація котлоагрегату, турбіни, статора генератора; заміна електрофільтрів; встановлення автоматичної системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) із системою моніторингу викидів вихідних газів ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , пил) [2].

Характеристики перспективних екологічних енергоблоків на твердому паливі за технологією факельного спалювання вугільного пилу надані в [3], де проведено зіставлення характеристик перспективних енергоблоків з характеристиками енергоблоків на стандартні надкритичні параметри пари (НКТ) 24 МПа/540/540°C. Варіанти 3 і 4 не задовольняють вимоги Директиви 2001/80/ЄС (концентрація оксидів сірки після системи сіркоочистки – 500 мг/куб. м, а концентрація оксидів азоту після системи азотоочистки – 350 мг/куб. м). Тільки варіант 5 задовольняє вимоги Директиви 2001/80/ЄС (концентрація оксидів сірки після системи сіркоочистки – 200 мг/куб. м, а концентрація оксидів азоту після системи азотоочистки – 150 мг/куб. м).

Інвестиційний проект Слов'янської ТЕС (2013 рік) передбачає реконструкцію енергоблока № 6 з розділенням на енергоблоки № 6а і № 6б потужністю 330 МВт кожний з установкою екологічно чистих котлоагрегатів з використанням технології спалювання вугілля в циркулюючому киплячому шарі (ЦКШ) [5]. Технологія дозволяє спалювати з високою економічністю паливо різної якості, включаючи вугілля, торф, сланці, біомасу та ін., при відносно невисокій температурі, що істотно знижує викиди забруднюючих речовин в атмосферу. ЦКШ називають «зеленою» технологією для теплової енергетики.

Починаючи з 80-х років минулого століття у світі побудовані і працюють 3000 котлів з ЦКШ встановленою потужністю 102 ГВт. Велика їх частина знаходиться в Китаї (47,7 ГВт), Європі – 12,4 ГВт, США – 12 ГВт, Індії – 9,6 ГВт, Південно-Східній Азії – 8 ГВт. У Європі найбільший прогрес впровадження котлів з ЦКШ досягнутий в Польщі, де встановлено більше 15 котлів для блоків потужністю більше 100 МВт. За 2003–2009 роки компанія Foster Wheeler ввела в експлуатацію найбільший в світі блок потужністю 460 МВт з котлом ЦКШ на ТЕС «Логіже» (вартістю ~ 400 млн євро). Енергоблок, розрахований на надкритичні параметри пари, оснащений системою поглибленого охолодження вихідних газів котлоагрегату з їх видаленням через градирню ТЕС, що сприяє підвищенню ККД котлоагрегату.

Таблиця 1 – Характеристики вугільних енергоблоків [2–5]

№ з/п	Тип енергоблока	Країна	Номінальна потужність, МВт	Питомі капітальні витрати, всього дол.США/кВт	ККД нетто, %	Термін служби, роки	Термін будівництва, роки	Літературне джерело
1	Пиловугільний блок НКТ без СО і АО	Україна	325	190	36,9	15	1	Запорізька ТЕС Ст. № 1, 3 [2]
2	Пиловугільний блок НКТ з МСО і СКАО	Україна	325	490	33,9	15	2	Те ж з МСО і СКАО [2]
3	Пиловугільний блок НКТ без СО і АО	РФ	660,1	52,2 тис. руб	39,2	40	4	[3]
4	Пиловугільний блок НКТ з СО і АО	РФ	660,2	53,1 тис. руб	43,76	40	4	[3]
5	Пиловугільний блок СКП з МСО і СКАО	РФ	660,2	58 тис. руб	43,40	40	4	[3]
6	ЦКШ НКТ	Польща	460	1150	43,3	40	4	Реалізований проєкт ТЕЦ Lagisza, 2009 рік [4]
7	ЦКШ	Україна	330	1290	43,0	40	4	Інвестиційний проєкт Слов'янської ТЕС ст. № 6 [5]

СО – сіркоочищення; АО – азотоочищення; МСО – мокра сіркоочищення; СКАО – селективна каталітична азотоочищення.

У ролі критерію оптимальності у світовій практиці останніми роками використовується середня зважена вартість електричної енергії за життєвий цикл, що позначається скорочено LCOE (Levelised Cost of Energy) [7, 8]. Вона являє собою середню ціну електричної енергії, яка забезпечує самокупність джерела її виробництва за весь цикл його існування.

З економічної точки зору цей показник враховує всі витрати впродовж життєвого циклу – початкові інвестиції, витрати на утримання і ремонти обладнання, паливні витрати та ін. Середня зважена вартість електричної енергії за життєвий цикл обчислюється за загальною формулою:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}},$$

де  $LCOE$  – середня зважена ціна електричної енергії за життєвий цикл, грн/МВт·год;  $t$  – поточний вік системи з початку спорудження (індекс у складових витрат);  $n$  – термін існуван-

ня проекту, роки;  $I_t$  – інвестиції, грн;  $M_t$  – витрати на обслуговування та ремонти, грн;  $F_t$  – умовно змінні витрати, грн;  $E_t$  – виробництво електричної енергії (нетто), МВт·год;  $r$  – дисконтна ставка (дисконт), що відображує швидкість здешевлення інвестицій з роками.

Порівняльні техніко-економічні розрахунки за критерієм LCOE проводили з використанням даних табл. 1, а також таких даних: річна кількість годин використання встановленої потужності – 6600 год/рік; вартість вугілля – 1100 грн/т н.п.; дисконтна ставка – 0,10 і 0,15; курс валют – 12,0 грн/дол. США; ставки податків за забруднення повітря: оксидами сірки – 1221 грн/т [6]; оксидами азоту – 1221 грн/т [6]; твердими частинками – 46 грн/т [6]. Частка умовно-постійних витрат, пов'язаних з експлуатацією, ремонтним та адміністративним обслуговуванням проектів, що порівнюються, визначалася на основі ретроспективного аналізу структури вартості виробництва електричної енергії на ТЕС генеруючих компаній України за даними НКРЕ України (рис. 1) і згідно з цими даними приймалася у розмірі 20% від виробничої вартості.

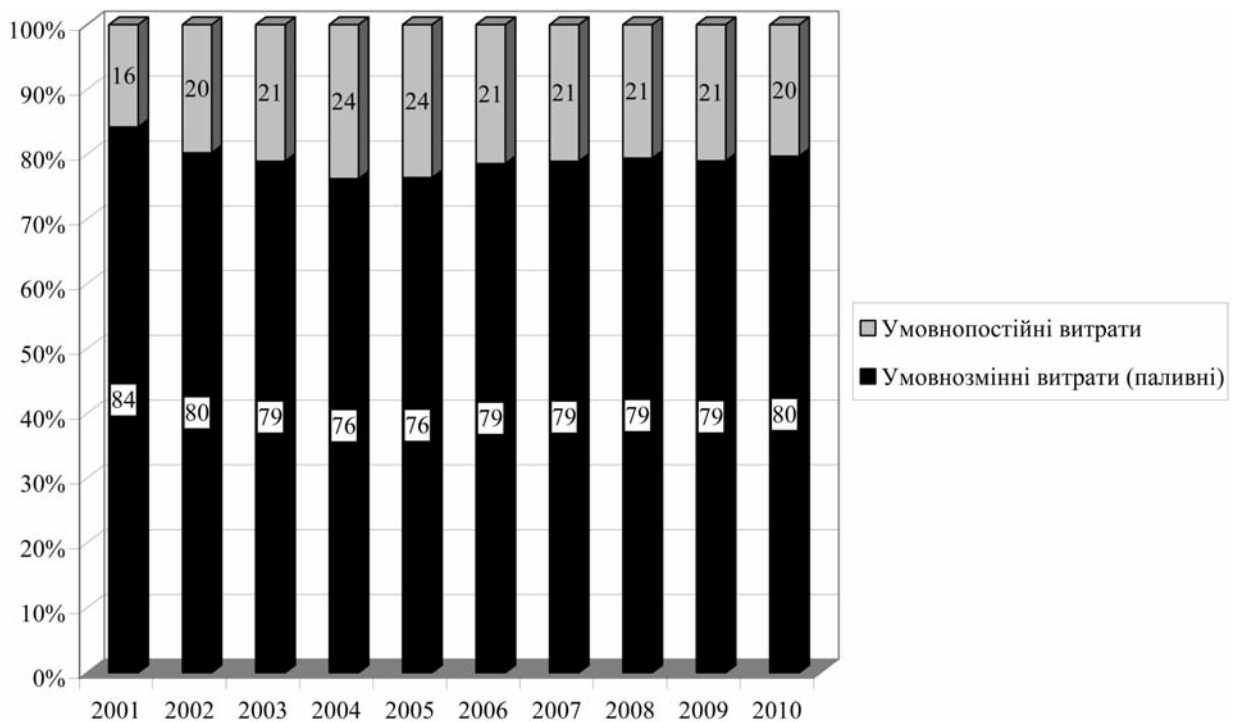


Рис. 1. Динаміка укрупненої структури вартості виробництва електричної енергії на ТЕС України у 2001–2010 роки

Для проведення розрахунків реконструкції та будівництва нових енергоблоків на теплових електростанціях країни було використано розроблений раніше програмно-інформаційний комплекс порівняльної оцінки вартості електричної енергії за життєвий цикл при спалюванні органічного палива в енергетичних установках [1].

Економічні показники енергоблоків включають питомі витрати інвестиційні, експлуатаційні, паливні та плату за викиди основних забруднювачів (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, пилові частинки) з димовими газами на 1 МВт·год виробленої електроенергії.

Результати розрахунків з 10% облікової ставки (дисконту) наведено у табл. 2 і з 15% облікової ставки – у табл. 3.

Отримані результати зіставні з даними Міжнародної енергетичної агенції (МЕА) по вартості електричної енергії від електростанцій, що працюють на вугіллі у різних країнах [7, 8].

Для наочності результати зіставлення середньої зваженої ціни електричної енергії за життєвий цикл від енергоблоків різної потужності з встановленим обладнанням сіркоочищення та азотоочищення і без нього, наведені на діаграмі на рис. 2.

Наведені результати обчислень свідчать про те, що за чинних ставок податків на викиди основних забруднюючих речовин з димовими газами згідно з Податковим кодексом України [6] встановлення додаткового природоохоронного обладнання (микрої сіркоочистки і системи очистки від оксидів азоту за технологією каталітичного відновлення) приводить до збільшення середньої зваженої вартості електричної енергії за життєвий цикл на 32–42% (дисконт 10% і 15%).

Витрати при будівництві нових енергоблоків ЦКШ за умов діючих ставок податків за забруднення повітря будуть порівняні з витратами за умов реконструкції енергоблоків з встановленням додаткового природоохоронного облад-

Таблиця 2 – Витрати, розраховані із 10% облікової ставки

№ з/п	Тип енергоблока	Країна	Номинальна потужність, МВт	Питомі капітальні витрати, всього дол.США/кВт	ККД нетто, %	Термін служби, роки	Термін будівництва, роки	Літературне джерело
1	Пилувугільний блок НКТ без СО і АО	Україна	325	190	36,9	15	1	Запорізька ТЕС Ст. № 1, 3 [2]
2	Пилувугільний блок НКТ з МСО і СКАО	Україна	325	490	33,9	15	2	Те ж з МСО і СКАО [2]
3	Пилувугільний блок НКТ без СО і АО	РФ	660,1	52,2 тис. руб	39,2	40	4	[3]
4	Пилувугільний блок НКТ з СО і АО	РФ	660,2	53,1 тис. руб	43,76	40	4	[3]
5	Пилувугільний блок СКП з МСО і СКАО	РФ	660,2	58 тис. руб	43,40	40	4	[3]
6	ЦКШ НКТ	Польща	460	1150	43,3	40	4	Реалізований проект ТЕЦ Lagisza, 2009 рік [4]
7	ЦКШ	Україна	330	1290	43,0	40	4	Інвестиційний проект Слов'янської ТЕС ст. № 6 [5]

Таблиця 3 – Питомі витрати, розраховані із 15% облікової ставки

Тип енергоблока	Витрати, дол. США / МВт·год				
	Інвестиційні	Експлуатаційні	Паливні	Плата за викиди	LCOE
Пилоугільний блок НКТ без СО і АО	11,60	10,56	42,22	2,33	66,72
Пилоугільний блок НКТ з МСО і СКАО	30,44	11,49	45,96	0,12	88,01
Пилоугільний блок НКТ без СО і АО	69,95	9,94	39,75	0,52	120,16
Пилоугільний блок НКТ з СО і АО	63,73	8,90	35,60	0,52	108,75
Пилоугільний блок СКП з МСО і СКАО	70,19	8,97	35,90	0,21	115,27
ЦКШ НКТ	43,24	9,00	35,98	0,24	88,47
ЦКШ	48,85	9,06	36,23	0,24	94,38

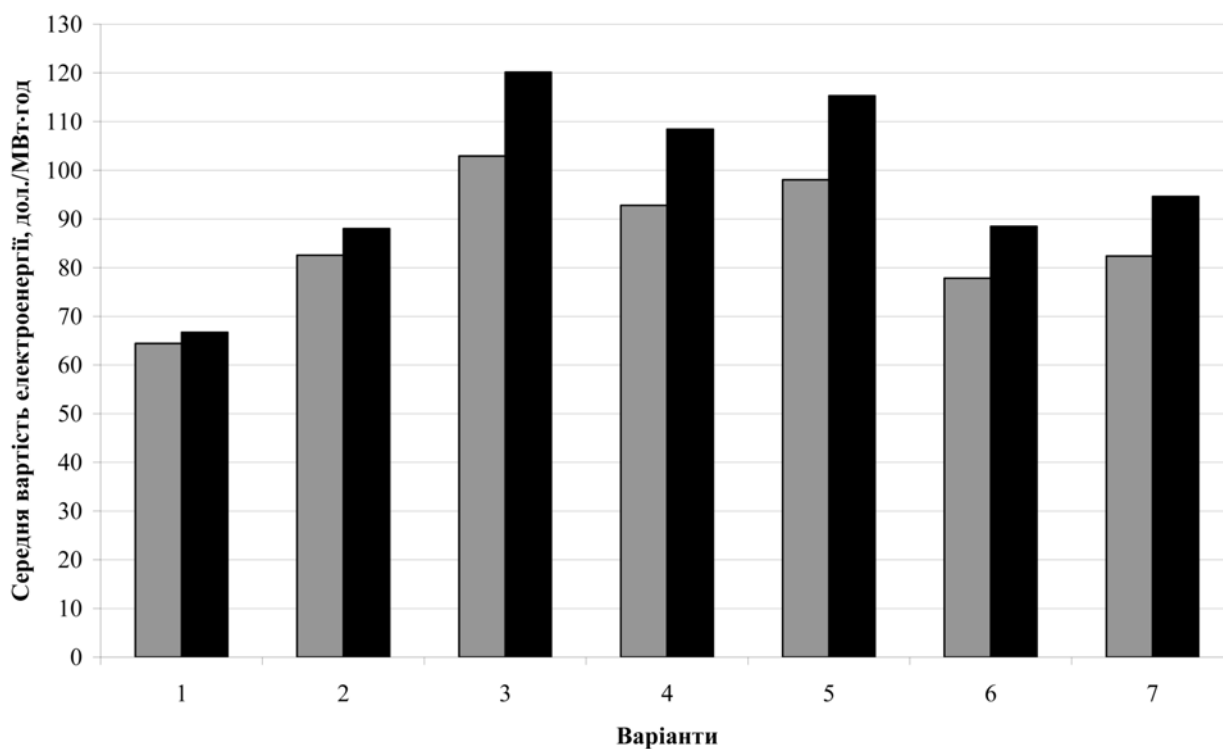
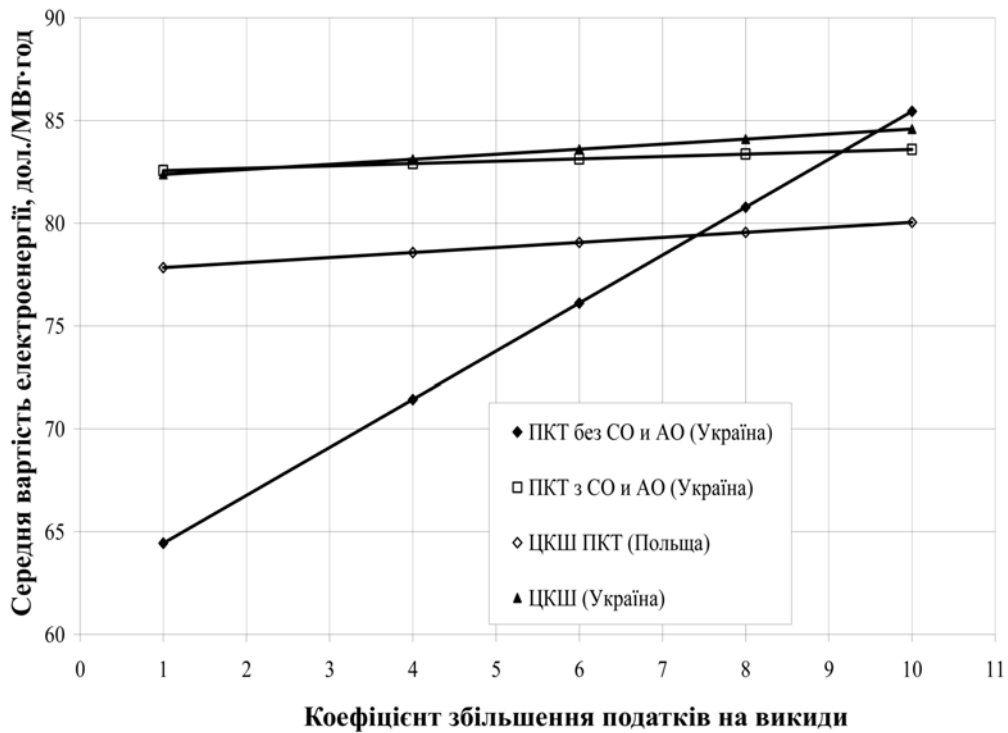
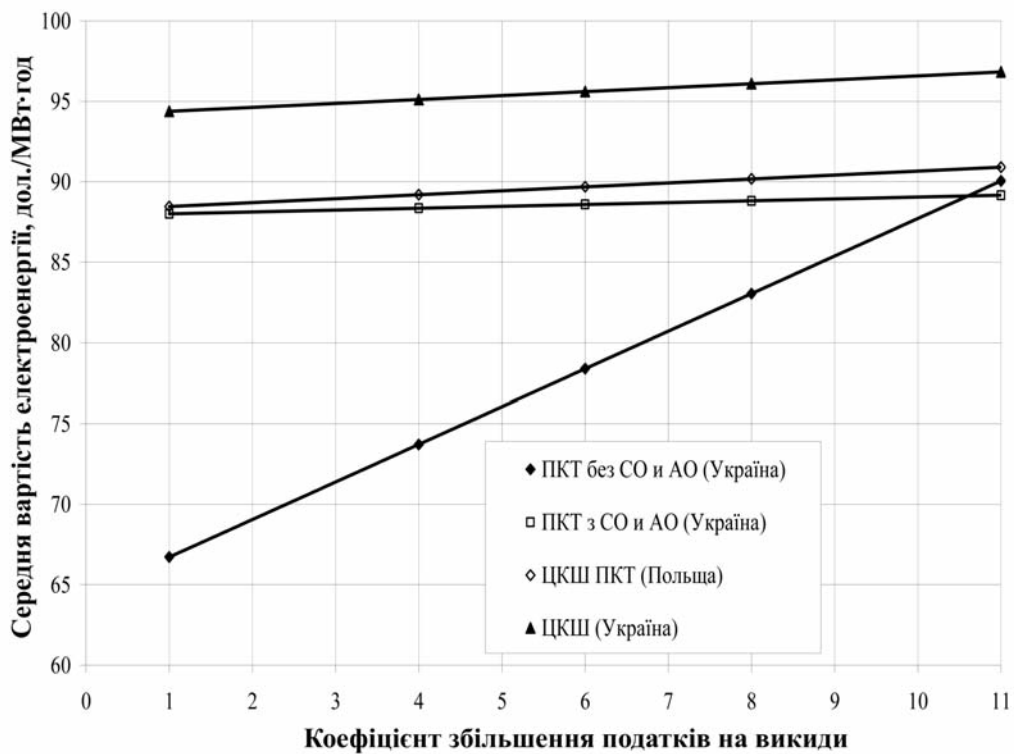


Рис. 2. Середня зважена вартість електричної енергії за життєвий цикл (LCOE) за чинних значень податків на викиди:

- 1 – пиловугільний блок НКТ без СО і АО (Україна, N = 325 МВт);
- 2 – пиловугільний блок НКТ з СО і АО (Україна, N = 325 МВт);
- 3 – пиловугільний блок НКТ без СО і АО (РФ, N = 660 МВт);
- 4 – пиловугільний блок НКТ з СО і АО (РФ, N = 660 МВт);
- 5 – пиловугільний блок СКП з СО і АО (РФ, N = 660 МВт);
- 6 – ЦКШ НКТ (Польща, N = 460 МВт); 7 – ЦКШ (Україна, N = 330 МВт)



**Рис. 3.** Середня вартість електричної енергії за життєвий цикл (дисконт 10%) залежно від кратності збільшення плати за викиди згідно з Податковим кодексом України (2010 рік)



**Рис. 4.** Середня вартість електричної енергії за життєвий цикл (дисконт 15%) залежно від кратності збільшення плати за викиди згідно з Податковим кодексом України (2010 рік)

нання. Отже, в умовах ринкової конкуренції впровадження природоохоронних технологій високої ефективності на окремих енергоблоках ТЕС не є інвестиційно привабливим за чинних ставок податків на викиди.

Проведено розрахунки середньої зваженої вартості електричної енергії за життєвий цикл за умов збільшення ставок податків на викиди основних забруднюючих речовин ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , пилові частинки) у 4, 6, 8, 10, 11 разів. Результати розрахунків середньої зваженої вартості електричної енергії за життєвий цикл при збільшених ставках податків наведено на рис. 3 (дисконт 10%) і рис. 4 (дисконт 15%).

На рисунках показано середні вартості електричної енергії за життєвий цикл залежно від кратності збільшення плати за викиди для найбільш привабливих варіантів (2, 5, 6) у порівнянні з базовим (1).

З рис. 3 і рис. 4 видно, що для забезпечення достатньої привабливості приватних інвестиційних вкладень у будівництво нових енергоблоків ЦКШ і встановлення додаткового природоохоронного обладнання (мочної сіркоочистки і системи каталітичного відновлення очистки від оксидів азоту) необхідно збільшити ставки податків на викиди основних забруднювачів атмосферного повітря ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , пилові частинки) від 9 разів (дисконт 10%) до більш ніж 11 разів (дисконт 15%), що приведе до зростання середньої зваженої вартості електричної енергії від ТЕС за життєвий цикл на 32–42%.

## ВИСНОВКИ

1. Виконання норм викидів основних забруднювачів атмосферного повітря згідно з сучасними вимогами, регламентованими Директивою Європейського парламенту та Ради 2001/80/ЄС, можливе на основі реконструкції існуючих пиловугільних енергоблоків ТЕС з встановленням високоефективного обладнання сіркоочистки і азотоочистки, а також будівництва нових енергоблоків підвищеної енергетичної і екологічної ефективності.

2. Показано, що в умовах України існує приблизний паритет проектів реконструкції існуючих енергоблоків НКТ та проектів побудови нових енергоблоків із спалюванням вугілля у циркулюючому киплячому шарі за критерієм середньої зваженої вартості електричної

енергії за життєвий цикл.

3. Проекти нового будівництва енергоблоків НКТ та СКП із факельним спалюванням вугільного пилу і комплексним очищенням високої ефективності потребують занадто високих капітальних вкладень і тому не є конкурентоспроможними.

4. Будівництво нових пиловугільних енергоблоків (на основі технології ЦКШ) або впровадження природоохоронних технологій високої ефективності (мокра сіркоочистка, СКВ, нові електрофільтри) на окремих енергоблоках ТЕС дає більші значення середньої вартості електричної енергії, ніж реконструйовані енергоблоки НКТ, не оснащені засобами сіркоочистки і азотоочистки, що знижує привабливість таких проектів для приватного інвестора.

5. Створення фінансового підґрунтя для забезпечення достатньої привабливості приватних інвестицій у природоохоронні заходи високої ефективності можливе за рахунок збільшення рівня податку на викиди від 9 разів (дисконт 10%) до більш ніж 11 разів (дисконт 15%), що приведе до зростання середньої зваженої вартості електричної енергії за життєвий цикл на 32–42%.

6. У зв'язку з цим необхідно приділяти більшу увагу розробці новітніх технологій природоохоронної діяльності, здатних забезпечити достатню ефективність скорочення викидів основних забруднювачів без істотного зростання вартості електричної енергії від ТЕС та альтернативних фінансово-економічних і адміністративних механізмів, що сприятимуть їхньому впровадженню.

1. *Дубовський С.В.* Техніко-економічні оцінки перспективних природоохоронних технологій теплової енергетики України / С.В. Дубовський, В.С. Коберник // Проблеми загальної енергетики. – 2013. – № 2. – С. 49–56.

2. *Енергоблок № 1 Запорізької ТЕС включено в мережу після реконструкції.* — Режим доступу до ресурсу: <http://www.dtek.com/uk/media-centre/press-releases/details/energoblok-1-dtek-zaporizjkoites-vkljucheno-v-mereshu-pisljarekonstruktsii#.VFefKMbgwg0>.

3. *Елисеєв Ю.В.* Перспективные экологич-



ные энергоблоки ТЭС на твердом топливе / Ю.В. Елисеев, Г.В. Ноздренко, В.С. Шепель // Материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива». Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского Отделения РАН. 13–16 ноября 2012 г. — С. 42.1–42.7.

4. *Jantti T.* Circulating Fluidized Bed Technology Towards 800 MWe Scale- Lagisza 460 MWe Supercritical CFB Operation Experience / Timo Jantti, Kimmo Rasanen. — Presented at Power Gen Europe Milan. Italy. June 7–9, 2011. — 21 p.

5. *Про схвалення* техніко-економічного обґрунтування «Слов'янська ТЕС ПАТ «Донбасенерго». Реконструкція енергоблока № 6 з розділенням на енергоблоки № 6б і № 6а потужністю 330 МВт кожний». — Режим доступу до ресурсу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/377-2013-p>.

6. *Податковий кодекс України* від 02.12.2010. Стаття 243.1 // *Голос України*. 04.12.2010.

7. *Projected Costs of Generating Electricity.* Nuclear energy agency. International energy agency, 2010. — 230 p.

8. *Projected Costs of Generating Electricity.* Nuclear energy agency. International energy agency, 2005. — 233 p.

9. *Вольчин І.А.* Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України / І.А. Вольчин, Н.І. Дунаєвська, Л.С. Гапонич та ін. — К.: Гнозис, 2013. — 308 с.

10. *Вольчин І.А.* Особенности внедрения высокоэффективной газоочистки в теплоэнергетике Украины / И.А. Вольчин // *Енергетика та електрифікація*. — 2014. — № 2. — С. 16–17.

*Надійшла до редколегії 06.11.2014 р.*