

УДК 621.18

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКЕЛЬНОГО СПАЛЮВАННЯ СУМІШІ ПІСНОГО ВУГІЛЛЯ І ЗОЛИ

А.О. Капустянський<sup>1</sup>

Досліджено зміни у структурі паливоспоживання тепловими електростанціями України внаслідок зупинки поставок донецького антрациту та визначено основні завдання для збереження функціональності вугільної галузі. Проаналізовано можливість використання непроектного твердого палива, шляхом його факельного спалювання в енергетичних котлах на короткочасну перспективу. Представлено результати експертних випробувань котлів марок ТП-15 з дослідженням факельного спалювання різних комбінацій золи антрациту і пісного вугілля. Розглянуто питання існування синергетичного ефекту за спалювання бінарних сумішей вугілля з різним метаморфізмом.

**Ключові слова:** котел, зола, факельне спалювання, антрацит, пісне вугілля, синергетичний ефект, рідке шлаковидалення.

**Актуальність теми.** За останні 25 років питанню реформування паливно-енергетичного комплексу (ПЕК) України практично не приділяли уваги. Тому дедалі більш запущеними ставали такі об'єкти галузі як теплові електростанції (ТЕС) і теплоелектроцентралі (ТЕЦ), вугільні шахти та фабрики вуглезабагачення. Головною особливістю роботи ТЕС (ТЕЦ) є їх націленість на використання вугільного палива місцевих родовищ із забезпеченням максимальної ефективності його спалювання завдяки специфіці котельного обладнання [1-2]. У період 2010-2013 рр. український вугільний ринок практично збалансувався, тобто задовольняв вимоги ТЕС (ТЕЦ) у твердому паливі за кількістю і розподілу за марками, проте зупинка поставок донецького антрациту (АШ) порушила встановлену рівновагу [3].

На сьогодні більшість антрацитових котлів змушені працювати на пісному вугіллі (П) з великим вмістом летких речовин або його суміші з АШ. Зараз у нас існують значні запаси і потужності з видобутку газової групи вугілля марок Г, ДГ [3-4]. Однак в Україні недостатньо пісного вугілля, щоб забезпечити всі котлоагрегати, що працюють на АШ. Тому виникає потреба в пошуку шляхів вирішення існуючої проблеми, одним з яких може бути спалювання бінарних сумішей золи АШ з вугіллям іншої міри метаморфізму, наприклад з маркою П або Г, реакційна здатність яких набагато вища [4]. Під час спалювання зазначених вище сумішей особливу увагу потрібно приділяти умовам рідкого шлаковидалення та проектного співвідношення розподілу тепла між топкою і конвективного частиною котла. Саме необхідність спалювання непроектованих марок вугілля на існуючому котельному обладнанні з використанням маловитратних конструктивних доробок сформувала потребу в цьому дослідженні.

**Мета роботи.** Дослідження змін у структурі паливоспоживання ТЕС (ТЕЦ) України. Забезпечення можливості безпечного та економічного спалювання в антрацитових котлоагрегатах ТП-15 Дарницької ТЕЦ суміші відпрацьованої золи антрациту з вугіллям марки "П", за умови не перевищення виходу летких речовин у суміші 15 %.

<sup>1</sup> пров. інженер А.О. Капустянський – ПрАТ "Техенерго"

**Виклад основного матеріалу.** Велика кількість котлів ТЕС (ТЕЦ) України через малі обсяги ремонтів і фізичне зношення устаткування [7], у разі факельного спалювання проектного антрациту, працюють з ККД ~ 80 %. Як показують досліді, спалювання АШ пов'язано з наднормативними тепловими втратами механічного недопалу, рівень якого досягає ~ 10-15 %, а частка газу, потрібного для забезпечення стійкого горіння та нормального рідкого шлаковидалення, становить від 10 до 20 % тепла [1, 8].

Зупинка поставок донецького АШ призвела до потреби придбання закордонного вугілля, а саме російського вугілля марки П (Прокоп'євськ) з виходом летких речовин ~ 15 %, що дало змогу істотно знизити дефіцит антрациту, на спалювання якого були розраховані котлоагрегати ТП-15.

Але, при переході на імпортоване вугілля марки П, виникла ціла низка проблем. По-перше, у деяких партіях пісного вугілля, що надійшло на склад Дарницької ТЕЦ, вміст летких речовин перевищував межу безпечного спалювання ( $V^{daf} > 18\%$ ), що потребує розбавлення його менш реакційним вугіллям. По-друге, тугоплавка зола погано виводиться з котлоагрегату, нагромаджуючись у значній кількості на поді котла та вимагаючи його зупинки для розшлакування. По-третє, на сьогодні не вирішено проблему зі стабільним постачанням вугілля на ТЕЦ та нагромадження його на зимовий період.

Можливим із способів спалювання суміші АШ і П є використання активатора горіння, наприклад REDUXCO, який довів позитивний вплив на зменшення механічного недопалу та полегшення шлаковидалення [9]. Іншим варіантом вирішення згаданих вище проблем може бути додавання в існуюче паливо певної частини легкої золи власного виробництва, що в значній кількості нагромаджена на золовідвалах Дарницької ТЕЦ.

Розбавлення золою пісного вугілля знижує до безпечного рівня вміст летких речовин та температуру плавкості золи суміші, що дасть змогу рідкій золі антрациту, витікаючи із котла, "захоплювати" із собою тугоплавку золу вугілля марки П. Також допалювання залишкового вуглецю золи виносу (вміст якого ~ 20-30 %) викликає зацікавленість з погляду економії вугілля. Котельний агрегат ТП-15, на якому проводили випробування – одnobарабаний, пиловугільний, з рідким шлаковидаленням (табл. 1).

Табл. 1. Характеристика пиловугільного котла ТП-15

Найменування	Розмірність	Значення
Паропроductивність	т/год	220
Тиск гострої пари	кгс/см <sup>2</sup>	100
Температура перегрітої пари	°C	540
Температура живильної води	°C	215

Котел розрахований на спалювання Донецького вугілля марки АШ з характеристиками робочої маси (табл. 2).

Треба зазначити, що існує низка особливостей котлів, які ускладнюють пиловидне спалювання антрациту, наприклад:

- недостатня висота топки та відсутність перетину, що зменшує повноту вигорання пилу і збільшує механічний недопал;
- недостатня для АШ температура первинного повітря (менше ніж 340°C);

- застаріла конструкція пальників (відсутність вихрової ежекції димових газів до кореня факелу), що ускладнює займання пилу.

**Табл. 2. Проектні характеристики Донецького АШ для котла ТП-15**

Найменування	Розмірність	Значення
Середня нижча теплота згорання, $Q_i^r$	ккал/кг	6000
Вологість, $W^r$	%	6,5
Зольність, $A^r$	%	17,3
Температура початку деформації золи	°C	1100
Температура плавлення золи	°C	1350
Вихід летких речовин, $V^r$	%	4,0

З огляду на ці особливості, спалювання донецького АШ з калорійністю 5500-5700 ккал/кг зазвичай потребує газового підсвічування з витратою газу за номінального навантаження близько 2700 нм<sup>3</sup>/год для стабілізації умов займання факелу та рідкого шлаковидалення. Результати технічного аналізу вугілля марки П та золи з золівідвалу, що в подальшому спалювались під час дослідів, наведено у табл. 3.

**Табл. 3. Характеристики золи антрацити та вугілля марки "П"**

Параметр	$W^r$ , %	$W^d$ , %	$A^d$ , %	$A^r$ , %	$A$ , %	$V^{dal}$ , %	$V^r$ , %	$S^d$ , %	$S^r$ , %	$Q_i^r$ , ккал/кг
Вугілля П	8,83	0,78	20,05	20,21	18,42	13,42	10,62	1,50	1,35	5839
Зола	12,4	0,12	73,20	73,29	64,20	6,18	1,65	0,48	0,42	1003

З результатів розрахунку калорійності видно, що її істотне зниження дає робоча волога. Тобто, якщо в подальшому використовувати золу виносу, то краще її брати сухою та гарячою з рециркуляції, а не з золівідвалу. Тим більше, що підвищена вологість золи може перешкоджати процесу пилоприготування, погіршуючи розмельні та сушильні властивості пилосистеми і млина.

**Спалювання суміші вугілля марок "АШ" та "П" без додавання золи** виносу за співвідношення 25/75 %. Метою цього дослідів було визначення вихідних характеристик роботи котлоагрегата під час спалювання палива без додавання золи. Надалі їх було використано для порівняння з наступними режимами під час спалювання вугілля марки П у суміші зі золою АШ (табл. 4).

Витрата природного газу на підсвічування становила 2400 нм<sup>3</sup>/год. Надалі така витрата газу зберігалась у всіх наступних дослідів.

**Спалювання суміші золи "АШ" та вугілля "П".** Приготування суміші відбувалося на підготовленому майданчику паливного складу шляхом багаторазового перемішування ковшем навантажувача штабеля вугілля та золи. Під час проведення дослідів з додаванням 10 % золи істотних змін у роботі котлоагрегату не спостерігалось. Витрата природного газу на підсвічування не змінювалась і становила 2400 нм<sup>3</sup>/год. Режим виходу рідкого шлаку також залишився без змін (див. табл. 4).

Збільшення частки леткої золи до 20 % істотно підвищило зольність суміші до  $A^d=28,97$  % та знизило калорійність до  $Q_i^r=4634$  ккал/кг у пробі сирого вугілля та до 3879 ккал/кг у вугільному пилу. За такої зміни показників якості вугілля варто було очікувати пониження температур у топці та можливого збільшення витрати природного газу на підсвічування.

Однак, навіть за таких показників якості палива витрата природного газу на підсвічування не збільшувалась зі збереженням усіх потрібних параметрів роботи котлоагрегату.

Під час проведення дослідів з додаванням 20 % леткої золи до суміші відбулись такі зміни в режимі спалювання, а саме:

- підвищення температури факелу на рівні пальників на 30-50°C;
- підвищення температури факелу у льотці на 10-15°C;
- поліпшення виходу рідкого шлаку та часткове розшлакування льоток.

**Табл. 4. Основні показники спалювання бінарних сумішей твердого палива**

Склад бінарної суміші палива	АШ25 %/ П 75 %	П90 %/ зола 10 %	П80 %/ зола 20 %
Парове навантаження котла, т/год	217	213	220
Тиск у барабані, кгс/см <sup>2</sup>	102	101	100
Температура перегрітої пари, °C	526	536	540
Тиск перегрітої пари, кгс/см <sup>2</sup>	93	92	91
Температура живильної води, °C	224	226	225
Тиск живильної води, кгс/см <sup>2</sup>	147	148	148
Тиск гарячого повітря, кгс/м <sup>2</sup>	212/220	190/200	210/210
Тиск холодного повітря, кгс/м <sup>2</sup>	358/344	340/320	319/319
Температура гарячого повітря, °C	288/288	315/325	312/312
Розрідження в топці, мм.вод.ст.	-0,4	-0,5	-1,0
Температура відхідних газів, °C	134/101	136/103	150/101
Вміст O <sub>2</sub> в режимному перетині, %	3,9/3,7	4,5/4,2	3,6/2,8
Вміст CO в режимному перетині, ppm	93/82	29/41	31/42
Вміст CO <sub>2</sub> в режимному перетині, %	15	14	13
Вміст NO <sub>x</sub> в режимному перетині, ppm	722	912	922
Витрата газу на підсвічування, нм <sup>3</sup> /год	2400	2400	2400
Температура ширм, відм. 30 м, °C	1040	1030	1040
Температура факелу на рівні пальників, °C	1541	1557	1594
Температура факелу в льотці, °C	1504	1515	1523
Спостережна температура шлаку, °C	1386	1398	1401
Вміст горючих у виносі, %	29	22	16

Треба зазначити, що при візуальному спостереженні, кількість виходу рідкого шлаку збільшилась не пропорційно від збільшення потрапляння золи з вугілля та леткої золи антрацити. Це свідчить про виплавлення з котлоагрегату золи, яка була раніше нагромаджена у нижній частині топки. Таке явище можна пояснити тим, що легкоплавка зола антрацити за кондуктивної теплопередачі добре розігріває та розплавляє тугоплавку золу пісного вугілля і захоплює її разом зі собою до системи шлаковидалення.

Протягом усіх експериментів значення  $V^d$  не перевищувало 15 %, що було важливою вимогою з погляду пожежної безпеки під час проведення дослідів.

У разі додавання леткої золи до палива, його зольність дещо збільшується, а разом із цим збільшується витрата паливної суміші на котел. При цьому варто очікувати збільшення витрат електроенергії на власні потреби (витрати електроенергії на млини, млинові вентилятори, пиложивильники тощо). У цій роботі не ставилось завдання з визначення змін витрат на власні потреби під час роботи котлів з додаванням леткої золи. Але, в рамках цієї роботи, той обсяг вимі-

рювань, що був виконаний та характеризував витрату на власні потреби, очевидних змін та закономірностей не виявив.

**Висновки та рекомендації.** Проведені теплотехнічні випробування показали принципову можливість використання як палива суміші вугілля марки П з легкою золою антрациту власного виробництва без погіршення якісних показників роботи котлоагрегату та без додаткового збільшення витрати природного газу на підсвічування.

Додавання легкої золи антрациту до пісного вугілля, що має підвищену температуру плавкості золи, сприятливо впливає на процес рідкого шлаковидання – легкоплавка зола антрациту, стікаючи з поду котла до системи шлаковидання, захоплює зі собою частинки тугоплавкого пісного вугілля та виводить їх із собою назовні.

Додавання легкої золи до складу суміші призводить до незначної економії (на рівні від 1,4 до 2,8 %) палива, а збільшення його зольності – до збільшення витрати вугілля до 25 %, що своєю чергою, призводить до незначного збільшення витрат електроенергії на власні потреби.

Розрахунки за даними проведених теплотехнічних випробувань показують, що залишковий вуглець у золі виносу антрациту при повторному допалюванні у топці має ступінь конверсії не більше 0,3, тобто вигоряє тільки на 30 %. Загалом, за додавання золи зі залишковим вуглецем зниження витрати вугілля буде зовсім незначним, тому потрібно розглядати додавання золи як спосіб зниження газового підсвічування за рахунок покращення текучості шлаку.

### Література

1. Капустянський А.О. Динаміка зміни якості твердого палива, що надходить на ТЕС // Проблеми енергозбереження та шляхи їх вирішення : матер. Міжнар. наук.-техн. конф., квітень 2013, Харків. – С. 131-135.
2. Коваленко О.В. Стан та перспективи розвитку паливно-енергетичного комплексу в Україні // Галицький економічний вісник : зб. наук. праць. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ. – 2015. – Т. 48. – № 1. – С. 18-25.
3. Гапонич Л.С. Коротка характеристика сучасного стану роботи ТЕС України / Л.С. Гапонич, Л.С. Дунаєвська, С.В. Яцкевич // Вугільна теплоенергетика: проблеми реабілітації та розвитку : зб. тез доп., 2014. – С. 79-82.
4. Чернявський Н.В. Опыт сжигания топливных смесей на ТЭС Украины и требования к их составлению / Н.В. Чернявский, И.Л. Голенко, Ю.Н. Филиппенко, Е.В. Рудавина // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии : сб. науч. стат. – К. : Изд-во НППК "Триакон". – 2010. – Вып. 3(5). – С. 104-108.
5. Пономарьов С.В. Особливості інституціоналізації українського енергоринку та їх вплив на цінову політику у паливно-енергетичному комплексі // Научные журналы НТУ "ХПИ". – Сер.: Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – Харків : Вид-во НТУ "ХПИ". – 2013. – № 1. – 123-129 с.
6. Можливості збереження пиловугільного палива в котлоагрегатах ТЕС / В.В. Платонов та ін. // Энергетика та електрифікація : зб. наук. праць. – К., 2010. – № 1. – С. 2-5.
7. Тимошик А.М. Визначення опадних умов роботи зношених енергоблоків / А.М. Тимошик // Энергетика та електрифікація : зб. наук. праць. – К., 2012. – № 5. – С. 31-35.
8. Капустянський А.О. Вплив характеристик палива та режимних факторів на роботу котлів // Наукові підсумки 2012 р., наук.-практ. конф., грудень 2012, Харків. – С. 25-26.
9. Капустянський А.А. Влияние катализатора горения на эффективность работы паровых котлов / А.А. Капустянский // Теплоэнергетика : сб. науч. тр. – 2014. – № 9. – С. 50-56.

Надійшла до редакції 21.08.2016 р.

### Капустянский А.А. Исследование факельного сжигания смеси тощего угля и золы

Исследованы изменения в структуре топливопотребления тепловыми электростанциями Украины вследствие остановки поставок донецкого антрацита и определены основные задачи для сохранения функциональности угольной отрасли. Проанализирована возможность использования непроектного твердого топлива, путем его факельного сжигания в энергетических котлах на кратковременную перспективу. Представлены результаты экспертных испытаний котлов марок ТП-15 с исследованием факельного сжигания разных комбинаций золы антрацита и тощего угля. Рассмотрен вопрос существования синергетического эффекта при сжигании бинарных смесей углей с разной степенью метаморфизма.

**Ключевые слова:** котел, зола, факельное сжигание, антрацит, тощий уголь, синергетический эффект, жидкое шлакоудаление.

### Kapustyanskyi A.O. Ways of Increasing Reliability and Efficiency of Non-project Solid Fuel Burning

We have studied the changes in the structure of fuel consumption by thermal power plants of Ukraine as a result of stopping the supply of anthracite from Donetsk and the main objectives to preserve the functionality of the coal industry. The possibility of non-project use of solid fuels, through its flaring in power boilers at the short-term perspective, is studied. The results of expert testing of boilers TP-15 brands with research flaring different combinations of ash anthracite and lean coal are presented. The problem of the existence of a synergistic effect on burning coals of binary mixtures with different degrees of metamorphism is investigated.

**Keywords:** boiler, ash, flaring, anthracite, lean coal, a synergistic effect, liquid ash removal.

### УДК 539.3

### АНАЛІЗ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПЛАСТИНЧАСТОГО ВІБРОІЗОЛЯТОРА

В.І. Корсак<sup>1,2</sup>

Розглянуто обернену задачу контактної взаємодії двох лінійно-пружних, симетрично викривлених пластин, випрямлення яких у процесі монтажу забезпечує рівномірне обтискання багатоплощової пружини, виконаної у вигляді пакету пластин, і спричиняє сталлий тиск на поверхнях контакту елементів пружини, що сприяє підвищенню демпфувальної здатності пластинчастого віброізолятора за рахунок використання конструкційного тертя. Поставлену задачу розв'язано у геометрично нелінійній постановці із залученням неklasичної теорії балок С. Тимошенка, з одночасним урахуванням деформацій згину та зсуву, без накладання будь-яких обмежень на значення лінійних і кутових переміщень. У параметричній формі отримано вирази узагальнених навантажень, координат серединних поверхонь викривлених пластин, переміщень та деформацій, що забезпечують заданий рівень рівномірного контактного тиску, а також отримано аналітичний розв'язок поставленої задачі в лінійній постановці.

**Ключові слова:** пластинчастий віброізолятор, багатоплощова пружина, демпфувальна здатність, обтискання викривленими пластинами, обернена контактна задача взаємодії пластин.

**Постановка проблеми.** Проблемі розсіювання енергії в системах з конструкційним демпфуванням у науковій літературі приділено значну увагу. Широкий

<sup>1</sup> аспір. В.І. Корсак – НУ "Львівська політехніка";

<sup>2</sup> наук. керівник: проф. С.В. Харенко, д-р техн. наук – НУ "Львівська політехніка".