

Топливо и енергетика

УДК 620.9:662.66

Чернявський М.В.¹, канд. техн. наук, **Провалов О.Ю.¹**, канд. техн. наук,
Безценний І.В.¹, **Моїсеєнко О.В.²**

¹ *Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: mchernyavski@yandex.com*

² *Технічний комітет України стандартизації ТК 92 «Вугілля та продукти його перероблення», Київ*

вул. Гната Юри, 9, оф. 34, 03148 Київ, Україна, e-mail: tcu92.kiev@ukr.net

Розробка методів, досвід приготування суміші антрациту з газовим вугіллям та її пиловидне спалювання на Зміївській ТЕС

В умовах скорочення поставок донецького антрациту та пісного вугілля внаслідок бойових дій на сході України вперше у світі вдалося вирішити науково-практичні проблеми, організувати шихтування однорідної суміші антрациту з 27–32 % газового вугілля на складі Зміївської ТЕС, а також її безпечне та ефективне спалювання на котлах ТП-100, ТПП-210, ТПП-210А з режимними характеристиками та експлуатаційними показниками, які не відрізняються від характерних для донецького пісного вугілля. Для державних вугільних підприємств це дало додатковий обсяг збуту, а для ТЕС суттєво розширило паливну базу, дозволило на нічних розвантаженнях зменшувати навантаження блоків до 65 % без підсвічування за рахунок більш стійкого займання та горіння паливної суміші порівняно з антрацитом. *Бібл. 10, рис. 11.*

Ключові слова: антрацит, пісне вугілля, газове вугілля, суміш, однорідність, вихід летких речовин, опробування, пиловидне спалювання, котлоагрегат, пилосистема.

Внаслідок бойових дій на сході України всі шахти та збагачувальні фабрики, що випускають вугілля марок А та П, залишилися на тимчасово неконтрольованій території Донбасу. Внаслідок цього поставки на ТЕС вугілля марок А та П суттєво скоротилися (рис.1). Навіть з урахуванням імпорту пісного вугілля з ПАР та РФ у літні місяці ПАТ «Центрэнерго» та ТОВ «ДТЕК Енерго» були змушені зупинити антрацитові ТЕС. Як наслідок, у 2015 р. виробництво електроенергії на ТЕС зменшилося на 44 % порівняно з 2013 р., її частка у загальному виробництві зменшилася до 33 %, що замало

для регулювання графіку енергоспоживання та загрожує енергетичній незалежності України [1, 2]. Особливо дефіцит вугілля марок А та П був відчутний на Трипільській та Зміївській ТЕС ПАТ «Центрэнерго» (рис.2).

Закупівля вугілля марок А та П на світовому ринку ускладнена тим, що з переходом на більш ефективні та екологічно чисті технології пиловидного спалювання з твердим шлаковиданням розвинені країни почали використовувати в основному вугілля газової групи, тому вже більше 25 років сегмент антрациту та пісного вугілля на світовому ринку не перевищує

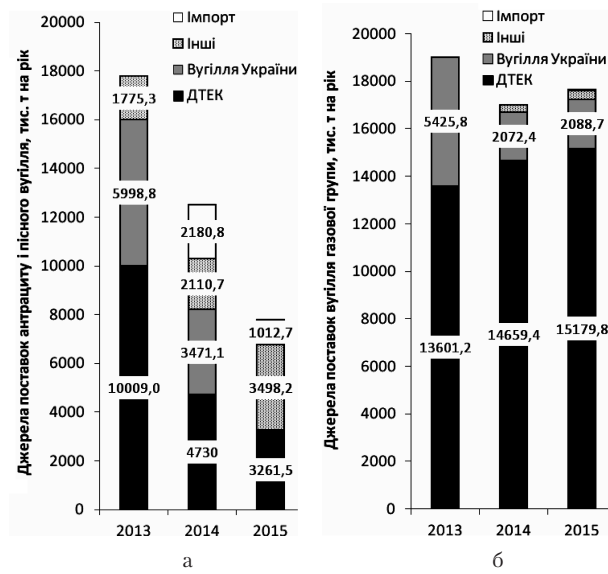


Рис.1. Зміни в структурі постачання антрациту та пісного вугілля (а) та вугілля газової групи (б) на ТЕС України у 2013–2015 рр.

5–10 %. Потенційними великими постачальниками вугілля цих марок залишилися тільки Росія (Кузбас) та ПАР. Задачу ефективного спалювання імпортованого пісного вугілля, що відрізняється від донецького тугоплавкою золою, було успішно вирішено ще наприкінці 2014 р. за участю Інституту вугільних енерготехнологій НАН України (ІВЕ НАН України) [3]. Проте обсяги постачання вугілля марки П з РФ обмежені політичними чинниками, з ПАР – пропускною здатністю наших портових терміналів. Загалом у 2015 р. імпорт марок А та П з Кузбасу (РФ) склав 380 тис. т (у тому числі 260 тис. т – на ТЕС ПАТ «Центренерго»), з ПАР – 630 тис. т (у тому числі 300 тис. т – на ТЕС ПАТ «Центренерго»).

Попри те, що поставки антрациту з українських вугільних підприємств, розташованих на тимчасово неконтрольованій території, з березня 2015 р. дозволені за спеціальним порядком, вони є вкрай ненадійними з огляду на штучні обмеження, спричинені бойовими діями та політичною нестабільністю. У 2015 р. ці поставки на ТЕС ПАТ «Центренерго» склали лише близько 1700 тис. т. Таким чином, загальні поставки на Трипільську та Зміївську ТЕС, що мають за проектне паливо донецькі антрацит та пісне вугілля, у 2015 р. склали 2260 тис. т проти 5360 тис. т у 2013 р., тобто менше половини від паливних потреб ТЕС.

З іншого боку, на підконтрольній території існують значні запаси та потужності з видобутку вугілля газової групи (марки Г, ДГ).

У 2015 р. вугільні підприємства ДТЕК в основному забезпечили електростанції ТОВ «ДТЕК Енерго», що спалюють газове вугілля, власною вугільною продукцією в обсязі близько 15,2 млн т. Державні підприємства ДП «Львіввугілля», «Волиньвугілля», «Селидіввугілля», ПАТ «Шахта Надія» видобули лише 4,8 млн т рядового газового вугілля, хоча їх виробничі потужності значно більші. Справа в тому, що гарантованими споживачами вугільної продукції газової групи марок від державних компаній залишаються лише Вуглегірська ТЕС ПАТ «Центренерго» (до 2 млн т/рік), Калуська та Черкаська ТЕЦ (до 1,3 млн т/рік). Обмеження збуту збільшує собівартість вугільної продукції державних підприємств, значно погіршує їх економічні показники.

За цих умов актуальною стає задача розширення паливної бази антрацитових ТЕС ПАТ «Центренерго» за рахунок вітчизняного вугілля газової групи.

Це питання розглядалося в рамках робочої групи при Міненерговугілля України з початку 2015 р. На засіданні секції НТР «Електроенер-

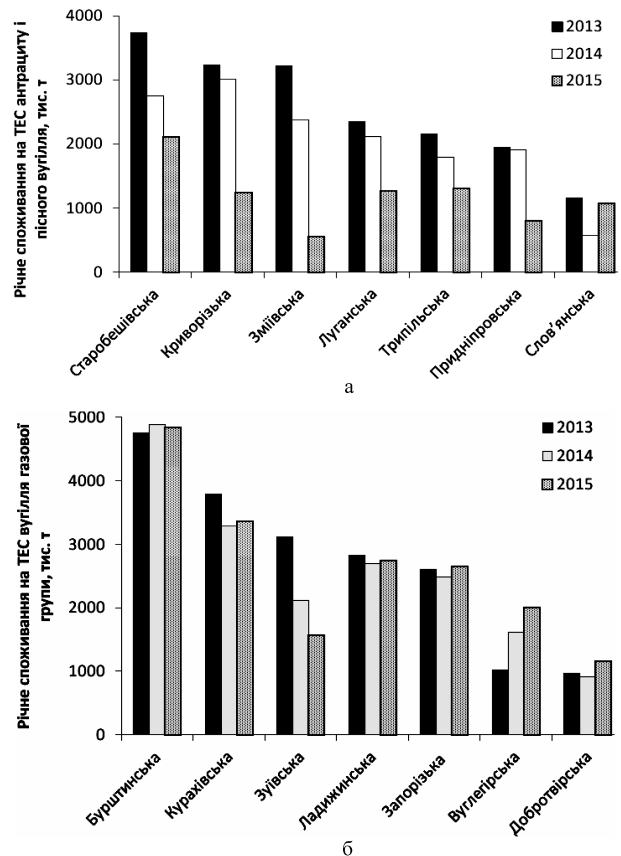


Рис.2. Динаміка споживання антрациту та пісного вугілля (а) та вугілля газової групи (б) на ТЕС у 2013–2015 рр.

гетика» відзначалося, що просте переведення на газове вугілля котлоагрегатів, що мають за проектне паливо вугілля марок А та П, є неможливим з огляду на принципово різні вибухо- та пожежосхильність вугілля цих груп марок, а впровадження належних проектних рішень та заходів щодо безпеки пилосистем та котлоагрегатів потребує тривалого розроблення, погодження проектів та значних капіталовкладень. У той же час на Трипільській та Зміївській ТЕС ПАТ «Центрэнерго» є позитивний досвід спалювання у 2009–2010 рр. суміші марок вугілля Г та А, яка постачалася з ЦЗФ «Слов'яносербська» як однорідне паливо з технологічними властивостями, що відповідали вугіллю марки П (далі – вугілля Г/А) [4–6]. З урахуванням цього досвіду до ДСТУ 4083:2012 «Вугілля кам'яне та антрацит для пилувидного спалювання на теплових електростанціях. Технічні умови» внесено доповнення про можливість постачання на ТЕС виготовлених належним чином паливних сумішей з доведенням можливості їх безпечного пилоприготування та спалювання шляхом відповідних випробувань.

У жовтні 2015 р. були укладені контракти щодо постачання вугілля марки П з ПАР на Трипільську ТЕС в основному конкретизувалися. Натомість паливозабезпечення Зміївської ТЕС на зимовий сезон 2015–2016 рр. залишалося негарантованим. За цих умов на нараді в Міненерговугілля України 13 жовтня 2015 р. було розглянуто питання про можливість використання суміші з вугілля марок Г, ДГ та АШ на блоках, запроектованих для роботи на паливі АШ та П, та схвалено у цілому розроблену ПАТ «Центрэнерго» за участю ІВЕ НАН України «Програму першочергових заходів з розширення паливної бази ТЕС ПАТ «Центрэнерго» із залученням вітчизняного вугілля газової групи».

Метою Програми було розширення паливної бази Зміївської ТЕС ПАТ «Центрэнерго» за рахунок використання однорідної паливної суміші з додаванням вітчизняного вугілля газової групи, яка за технологічними характеристиками відповідає вугіллю марки П, у стислі терміни до початку осінньо-зимового періоду 2015–2016 років.

Програма мала такі основні етапи:

– виготовлення пробної партії паливної суміші з додаванням вітчизняного вугілля газової групи на складі Зміївської ТЕС, випробування суміші з доведенням її належної однорідності та відповідності марці П 1-ї категорії якості за показниками калорійності, зольності, вологості, виходу летких речовин;

– випробувальне спалювання пробної партії паливної суміші на обраному котлоагрегаті Зміївської ТЕС;

– організація довготривалого випробувального спалювання паливної суміші на одному-двох котлоагрегатах Зміївської ТЕС.

Були передбачені такі основні виконавці: Зміївська ТЕС ПАТ «Центрэнерго» як об'єкт впровадження, ІВЕ НАН України як провідна фахова установа, що мала досвід наукового супроводу паливopідготовки та випробувального спалювання вугілля Г/А, Технічний комітет України стандартизації ТК 92 «Вугілля та продукти його перероблення», «УкрНДІвуглезабагачення», ВАТ «ЛьвівОРГРЕС».

На виконання вказаної Програми були розроблені, узгоджені названими організаціями та Державною інспекцією з експлуатації електричних станцій і мереж та затверджені директором Зміївської ТЕС «Робоча програма виготовлення та випробування пробної партії паливної суміші з додаванням вітчизняного вугілля газової групи з характеристиками, що відповідають вугіллю марки П» та «Робоча програма випробувального спалювання пробної партії паливної суміші з характеристиками, що відповідають вугіллю марки П».

Науково-практичні аспекти проблеми

Вище вказувалося на досвід спалювання вугілля Г/А Трипільській та Зміївській ТЕС протягом зимового сезону 2009–2010 рр. Проте тоді частка газового вугілля в суміші не перевищувала 10–12 %, вихід летких речовин для сухого беззольного стану – 8–10 %, що принципово не змінювало характер горіння факелу та вимоги до вибухо- та пожежобезпеки пилосистем. У той період складання суміші Г/А (шихтування) відбувалося на збагачувальній фабриці, на ТЕС здійснювався лише вибірко-вий контроль за невиходом значень виходу летких речовин у точкових пробах за верхню межу для пісного вугілля 18 % (згідно з ДСТУ 3472:2015 «Вугілля буре, кам'яне та антрацит. Класифікація»). Натомість Програмою було передбачено шихтування на складі ТЕС, доведення частки газового вугілля у суміші до 25–30 % та виходу летких речовин до 15 % із забезпеченням умов безпечної експлуатації пилосистем без впровадження додаткових заходів вибухо- та пожежобезпеки, а також забезпечення умов безпечного спалювання без конструктивних змін пальників та розподілу повітря. Така задача ставилася вперше у світі. Для її розв'язання слід було вирішити такі наукові та практичні проблеми:

– розробити та відпрацювати технологічну схему рівномірного шихтування антрациту та пісного вугілля у заданій пропорції;

– розробити та відпрацювати критерії та методи контролю однорідності паливної суміші до її подачі на виробництво;

– створити умови для запобігання та експериментально довести відсутність сегрегації паливної суміші та пилу за крупністю частинок та виходом летких речовин;

– обґрунтувати та експериментально довести відсутність негативного впливу більш реакційного газового вугілля на займання та горіння менш реакційного антрациту.

З урахуванням положень ДСТУ 4083 та досвіду спалювання вугілля Г/А попередньо були встановлені такі загальні вимоги до складу паливної суміші:

– у будь-якому обраному обсязі суміші вихід летких речовин на сухий беззольний стан палива (тут та далі – при фактичній зольності) V_{daf} має бути не більш 18 %;

– середня калорійність суміші – не менш 5400 ккал/кг;

– вміст води – не більш 10 %;

– клас крупності менш розмелоздатного антрациту має бути 0–6 або 0–13 мм, більш розмелоздатного газового вугілля – 0–13 або 0–25 мм;

– зольність компонентів має відрізнятися не більш ніж на 4–5 %, вміст води – не більш ніж на 2–3 %.

У роботі [7] було показано, що для виконання першої вимоги середнє по партії суміші значення V_{daf} має задовольняти вимозі $(V_{daf} + СКВ) \leq 18 \%$, де СКВ – середньоквадратичне відхилення значень V_{daf} у точкових пробах, відібраних від партії суміші згідно з вимогами ДСТУ 4096-2002 «Вугілля буре, кам'яне, антрацит, горючі сланці та вугільні брикети. Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань» для сортованого палива. Зокрема, при СКВ = 3 % максимальне середнє значення $V_{daf} \leq 15 \%$.

При масовій частці газового вугілля у суміші x значення показників якості суміші визначаються такими виразами:

$$(1 - x) W_{tA}^r + x W_{tB}^r = W_{t\Sigma}^r;$$

$$(1 - x) V_A^r + x V_B^r = V_{\Sigma}^r;$$

$$(1 - x) Q_{iA}^r + x Q_{iB}^r = Q_{i\Sigma}^r,$$

де W_{tA}^r , V_A^r , Q_{iA}^r – вміст загальної води, вихід летких речовин та нижча теплота згорання, перераховані для робочого стану палива; А, В, Σ

– нижні індекси, що застосовуються до антрациту, газового вугілля та суміші відповідно.

Для розрахунку складу суміші спочатку встановлюють значення $x = 0,4$ та за наведеними виразами перевіряють виконання вищевказаних вимог по показниках, що перелічені. У випадку невиконання вимог хоча б для одного показника величину x зменшують, перевірку повторюють. Шуканий параметр x вважається знайденим, якщо всі три показники задовольняють наведеним вимогам.

Особливості вугільного складу Зміївської ТЕС (рис.3) полягають у наявності:

– можливості подачі палива зі складу бульдозерами через підземні приймальні бункери БП-3, БП-5, а також грейферними кранами-перевантажувачами через приймальні бункери, розташовані над галереєю стрічкових транспортерів ЛТ-14, ЛТ-9, ЛТ-10;

– галереї стрічкових транспортерів ЛТ-7, ЛТ-8, ЛТ-13 для вивантаження палива уздовж складу, що дає змогу повертати паливну суміш на склад для випробування однорідності.

Виходячи з цього, було розроблено три технологічні схеми шихтування на складі ТЕС за принципом «один конвеєр – два живильники» (з двох окремих штабелів антрациту та газового вугілля; зі штабеля та вагоноперекидача; з двох вагоноперекидачів антрациту та газового вугілля) з поверненням суміші на склад для випробування однорідності. При цьому регулювання складу суміші виконувалося за рахунок зміни продуктивності попередньо відтарованих живиль-

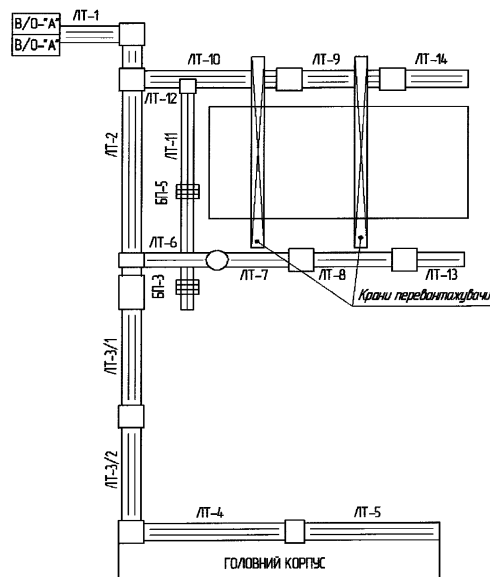


Рис.3. Схема вугільного складу Зміївської ТЕС: В/О – вагоноперекидач; ЛТ – стрічковий транспортер; БП – бункер приймальний.

ників під приймальними бункерами та вагоноперекидачами. В усіх випадках паливна суміш поверталася на склад з метою контролю однорідності, для чого формувалася окрема штабель суміші на виділеній ділянці складу.

Для контролю однорідності суміші точкові проби відбирали вручну під час завантаження штабелю суміші на вугільний склад ТЕС з постійним інтервалом за масою. Згідно з ДСТУ 4096-2002 «Вугілля буре, кам'яне, антрацит, горючі сланці та вугільні брикети. Методи відбору та підготовки проб до лабораторних випробувань», мінімальна кількість точкових проб для партії суміші масою до 1000 т становить $n = 16$. Мінімальну кількість точкових проб від партії суміші масою більше ніж 1000 т обчислюють за формулою:

$$n_1 = n (M/1000)^{0,5},$$

де M — маса партії суміші, від якої відбирають пробу, т.

Для збільшення представництва проб відбиралася така кількість точкових проб від партії при масі партії: від 1000 до 2000 т — 24; від 2000 до 3000 т — 36; від 3000 до 4000 т — 40; понад 4000 т — 10 точкових проб на кожні повні 1000 т, 1 точкова проба на кожні 100 т з неповної 1000 т.

Для забезпечення достовірності випробування точкові проби мають бути рівномірно розподілені по всьому обсягу партії суміші. Для цього було застосовано такі варіанти процедури відбору. За першим, при формуванні штабелю на рівну площадку грейферним краном висипали окремі купи суміші та відбирали точкові проби з кожної третьої або четвертої (залежно від об'єму партії) купи. При цьому, згідно з ДСТУ 4096, у кожну точкову пробу відбирали 5 порцій: з центру та з 4 боків — на половині схилу. Недоліком цього варіанту була необхідність досить частого переміщення крану впоперек штабелю.

За другим, більш простим варіантом, в одному положенні крану насипали вал з 28 грейферів (приблизно 500 т, шириною в основі близько 6 м, висотою близько 2 м, довжиною близько 60 м). Кран тимчасово зупиняли, відбирали належну кількість точкових проб з точок, рівномірно розподілених за довжиною гребеня валу. У кожну точкову пробу відбирали не менш ніж три однакові порції: одну на гребені валу, дві на середині схилів — при глибині лунок 0,4 та 0,6 м. Потім вал рівняли бульдозером, утворюючи площадку для насипу наступного валу, та процедуру повторювали без поперечного зміщення крану. Кожну точкову

пробу ділили на 2 порції: одну використовували для складання об'єднаної проби, іншу готували та аналізували окремо для статистичного аналізу показників на однорідність.

Системи паливopодачі та пилоприготування Зміївської ТЕС при використанні палива з середнім виходом летких речовин $V_{daf} \leq 15\%$ не потребують додаткових заходів пожежо- та вибухобезпеки [3]. У роботах [5, 6] було показано, що при проходженні тракту паливopодачі додаткове перемішування палива більш ймовірне, ніж сегрегація. Натомість за рахунок різної розмелоздатності та різної густини антрациту та газового вугілля можлива сегрегація пилу за виходом летких речовин у бункері, трактах повернення сепаратору та у виносі з циклону. Для контролю відсутності сегрегації при випробувальному спалюванні було передбачено відбір проб з живильників сирого вугілля (ЖСВ), живильників пилу, сепаратору та циклону (рис.4).

Суттєві побоювання викликало спільне спалювання низькорекційного антрациту з газовим вугіллям, яке відрізняється високим вихо-

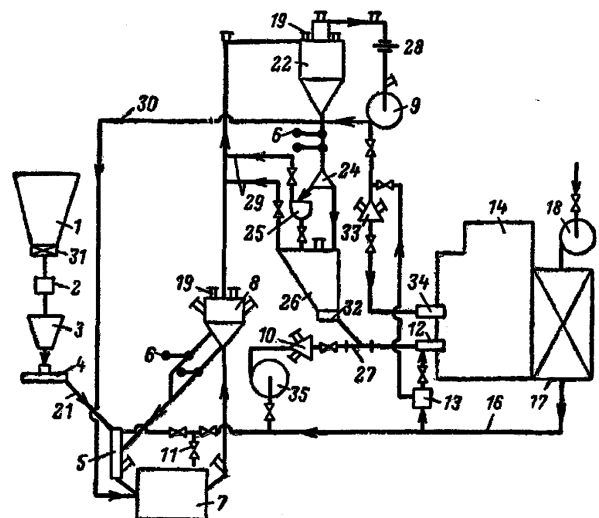


Рис.4. Індивідуальна замкнута схема пилоприготування з кульбарабанним млином, проміжним бункером пилу та з сушильним агентом-повітрям, застосована для вугілля марок А та П: 1 — бункер вугілля; 2 — ваги; 3 — ваговий бункер; 4 — живильник сирого вугілля; 5 — пристрій для низхідної сушки; 6 — мигалка; 7 — млин; 8 — сепаратор; 9 — млиновий вентилятор; 10 — короб первинного повітря; 11 — клапан присадки холодного повітря; 12 — палик основний; 13 — короб вторинного повітря; 14 — парогенератор; 16 — повітропровід гарячого повітря; 17 — повітропідігрівник; 18 — дугтьовий вентилятор; 19 — вибуховий клапан; 21 — тічка сирого вугілля; 22 — циклон; 24 — перекидний шибер; 25 — шнек; 26 — бункер пилу; 27 — змішувач; 28 — вимірвальна шайба; 29 — трубопровід вологовідсосу; 30 — трубопровід рециркуляції; 31 — відсичний шибер; 32 — живильник пилу; 33 — короб скидного повітря; 34 — скидний палик; 35 — вентилятор гарячого повітря.

дом летких речовин. Досі вважалося, що оскільки леткі речовини та високореакційний коксовий залишок газового вугілля згоряють раніше антрациту, це обумовлює зменшення концентрації кисню і, як наслідок, суттєво уповільнює займання та вигорання антрациту. Саме з цієї причини ГКД 34.20.507-2003 «Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила» (ПТЕ) не допускає спалювання суміші палив з різко відмінними реакційними характеристиками.

Однак попередні оцінки, зроблені в роботі [8] з використанням кінетичних констант, одержаних академіком О.Ю.Майстренком для українського енергетичного вугілля [9], показали, що при рівнях температур, характерних для пиловидного спалювання з рідким шлаковидаленням (РШВ), пиловидні частинки газового вугілля горять у зовнішньодифузійному режимі, а антрациту — у перехідному, де залежність швидкості горіння від температури значно сильніша. Тому зменшення швидкості горіння антрациту за рахунок зниження концентрації кисню може бути значною мірою компенсоване збільшенням температури факелу внаслідок інтенсивного тепловиділення при згорянні летких речовин та коксового залишку газового вугілля. Але ці попередні оцінки могли бути підтверджені лише промисловими випробуваннями.

Підготовка та спалювання пробної партії суміші

Підготовка та спалювання пробної партії паливної суміші виконувалися на складі Зміївської ТЕС під керівництвом ІВЕ НАН України за участю ТК 92 у період з 12 по 20 листопада 2015 р. Для змішування використовували такі палива: антрацит розміром 0–6 мм ($W_{\text{t}} = 8,2\%$, $A^{\text{d}} = 21,0\%$, $V^{\text{daf}} = 4,5\%$, $Q_{\text{t}} = 5500$ ккал/кг) та донецьке газове вугілля розміром 0–13 мм ($W_{\text{t}} = 8,5\%$, $A^{\text{d}} = 23\%$, $V^{\text{daf}} = 39\%$, $Q_{\text{t}} = 5450$ ккал/кг). Загалом виготовлено 4025 т паливної суміші, в її складі газового вугілля було 997 т (близько 25 %); з них відібрано та проаналізовано окремо 74 точкові проби. СКВ виходу летких речовин у точкових пробах від середнього значення $V^{\text{daf}} = 12,5\%$ не перевищувало 2,2 % (рис.5, а), значення виходу летких речовин у точкових пробах з 95 %-ю ймовірністю не виходило за межі для марки П (8–18 %). Випробуваннями було доведено достатню однорідність виготовленої на складі ТЕС суміші для забезпечення умов пожежо- та вибухобезпеки пилосистем та ефективного спалювання з РШВ без підсвічування.

На підставі результатів випробування були розроблені «Тимчасова інструкція з виготовлення та контролю показників якості паливної суміші з характеристиками, що відповідають вугіллю марки П, на складі Зміївської ТЕС» (ІВЕ НАН України), стандарт підприємства СТП 05.1-3064-1927-001:2015 «Вугілля кам'яне та антрацит. Методика виконання шихтування та контролювання якісних, технологічних показників однорідності суміші вугілля», ТУ У 05.1-30641927-112:2015 «Вугілля кам'яне для пиловидного спалювання. Технічні умови» (ТК 92).

Випробувальне спалювання пробної партії вугільної суміші проводилося за участю ВАТ «ЛьвівОРГЕС» та ІВЕ НАН України на котлі ТП-100 блоку № 6 потужністю 200 МВт Зміївської ТЕС з 20 по 22 листопада 2015 р. Котел працював у діапазоні навантажень блоку 130–165 МВт при тонині вугільного пилу $R_{90} = 7,3\%$. У ході випробувань було встановлено:

- після проходження пересипів тракту паливopoдачі та бункеру сирого вугілля (БСВ) однорідність суміші суттєво збільшується, СКВ виходу летких речовин у точкових пробах з живильників сирого вугілля (ЖСВ) зменшується від 2,2 до 0,5 % (рис.5, б);

- експлуатаційні показники пилосистем не відрізняються від характерних для пісного вугілля;

- сегрегація пилу за виходом летких речовин відсутня (у пробах пилу з живильників, циклону, внутрішнього та зовнішнього контурів сепаратора розкид V^{daf} не перевищував $\pm 0,7\%$);

- режимні характеристики та експлуатаційні показники котлоагрегату не відрізняються від характерних для пісного вугілля, витік шлаку при мінімальних навантаженнях покращується порівняно з антрацитом;

- вміст горючих у легкій золі складає 15,9–19,3 %, втрати тепла з механічним недопадом — 4,2–5,2 %, що є характерним для суміші антрациту з донецьким пісним вугіллям.

За результатами випробувань ВАТ «Львів-ОРГЕС» розробило «Тимчасові режимні вказівки роботи котла ТП-100 ст. № 6 при спалюванні суміші вугілля антрацитової та газової груп» та режимні карти для котлів блоків 200 та 300 МВт.

Досвід складання та спалювання суміші антрациту з газовим вугіллям у 2016 р.

Лише до 15 липня 2016 р. на Зміївську ТЕС надійшло 656,8 тис. т вугілля, з них марки П — 87,3 тис. т, марки А — 364,6 тис. т, марки Г (здебільшого з ДП «Вугільна компанія «Краснолиманська») — 204,9 тис. т. Використа-

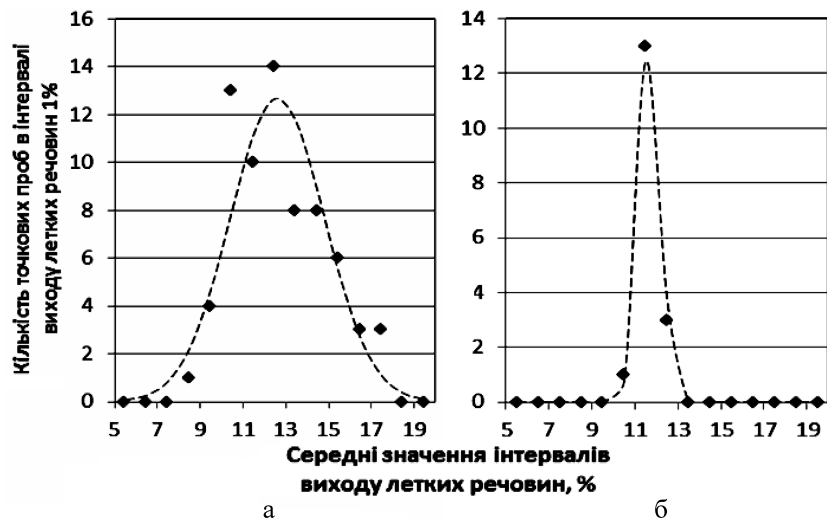


Рис.5. Розподіл щільності ймовірності виходу летких речовин у точкових пробах пробної партії паливної суміші: а – на складі Зміївської ТЕС після змішування; б – на вході у млини після проходження системи паливоподачі.

но 733,3 тис. т, з них марки П – 89,8 тис. т, марки А – 457,9 тис. т, марки Г – 185,6 тис. т. Таким чином, вугілля марки Г складало 31,1 % у поставках та понад 25 % у паливоспоживанні Зміївської ТЕС. Динаміку поставок та використання вугілля різних марок наведено на рис.6.

Антрацит та газове вугілля постачалися на виробництво виключно у складі суміші. Частка

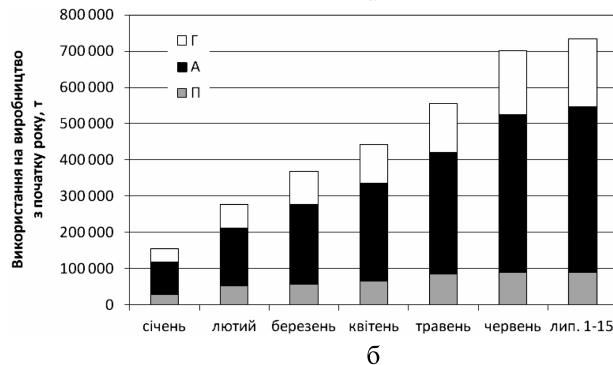
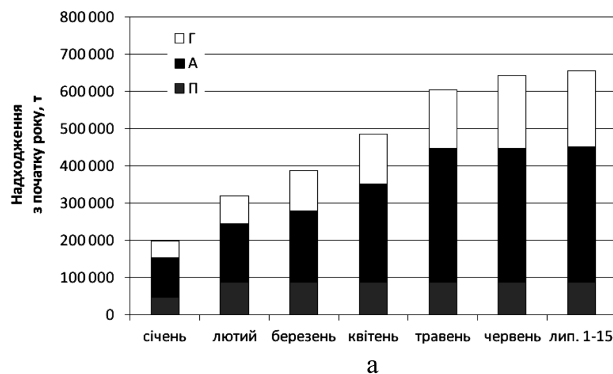


Рис.6. Динаміка надходження (а) та використання (б) вугілля на Зміївській ТЕС у I півріччі 2016 р.

газового вугілля у суміші коливалася від 26,7 до 31,5 %, вихід летких речовин суміші – від 13,6 до 15,8 %, тобто не виходив за межі, встановлені для вугілля марки П (рис.7).

Паливна суміш виготовлялася здебільшого за технологічною схемою «з двох вагонперекидачів» партіями від 800 до 4000 т. Від кожної партії відбиралися точкові проби згідно з СТП 05.1-30641927-001 у кількості від 20 до 35 та аналізувалися окремо для контролю однорідності суміші. Як приклад, на рис.8 наведена щільність розподілу виходу летких речовин у точкових пробах сирого вугілля у порівнянні з нормальним розподілом за 15-денні періоди з 1 червня по 15 липня 2106 р. Оскільки СКВ летких речовин у точкових пробах від середнього значення в партіях не перевищували 2,0 %, у жодному випадку за одержаним ступенем однорідності не було потреби у повторному шихтуванні суміші.

Під керівництвом ІВЕ НАН України 21 липня 2016 р. було виконане контрольне випробування однорідності вугільної суміші, що зберігалася на складі ТЕС у витратному штабелі, в обсязі партії, яка подавалася до БСВ котла блоку ст. № 5, та з ЖСВ котла блоку ст. № 5 від початку до кінця подачі тіїєї самої партії суміші з БСВ до млинів. Вугілля до БСВ подавалося субпартіями по 200–210 т, з кожної субпартії перед подачею (зі штабелю) відбиралося по 6 точкових проб. Дещо збільшений розкид точкових проб був, ймовірно, пов'язаний з сегрегацією суміші по ходу спрацювання штабелю, проте у кожній субпартії середнє значення виходу летких речовин не перевищувало 16,4 %.



Рис.7. Динаміка складу та виходу летких речовин вугільної суміші у I півріччі 2016 р.

Основні результати випробування (рис.9):

– партія на складі (проби з витратного штабелю): середні значення $W_{tг} = 8,0 \%$, $A^d = 22,5 \%$, $V_{daf} = 15,6 \%$, СКВ = 2,4 %;

– партія з ЖСВ: середні значення $W_{tг} = 7,8 \%$, $A^d = 22,7 \%$, $V_{daf} = 14,9 \%$, СКВ = 0,6 %.

Це підтверджує, що паливна суміш, складена в звичайних експлуатаційних умовах, за виходом летких речовин відповідає пісному вугіллю, однорідність суміші на складі є задовільною: граничне значення для марки П $V_{daf} = 18 \%$ не перевищує 83 % точкових проб,

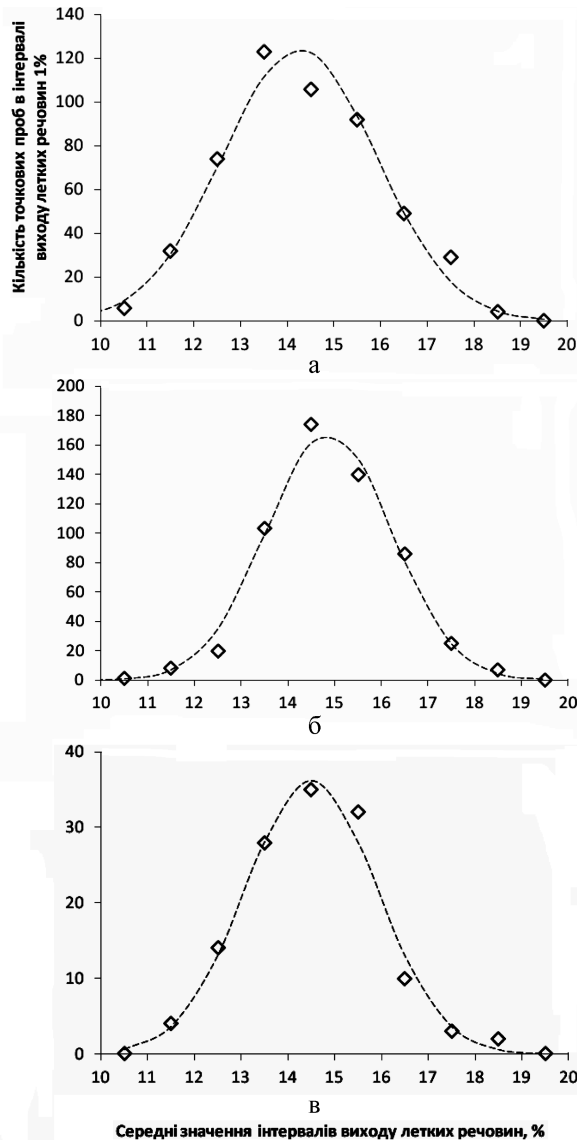


Рис.8. Щільність розподілу значень виходу летких речовин V_{daf} у точкових пробах суміші в порівнянні з нормальним розподілом: а – 1–15 червня 2016 р., середнє значення $V_{daf_c} = 14,3 \%$, СКВ = 1,7 %; б – 16–31 червня 2016 р., $V_{daf_c} = 14,9 \%$, СКВ = 1,3 %; в – 1–15 липня 2016 р., $V_{daf_c} = 14,5 \%$, СКВ = 1,4 %.

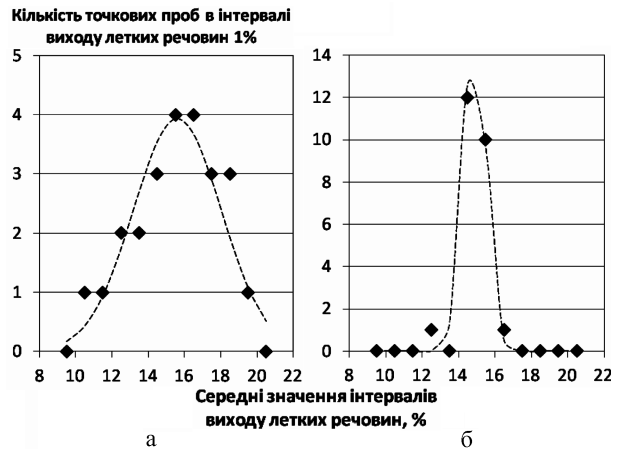


Рис.9. Щільність розподілу значень виходу летких речовин V_{daf} у точкових пробах вугільної суміші у порівнянні з нормальним розподілом: а – зі штабелю, $V_{daf_c} = 15,6 \%$, СКВ = 2,4 %; б – з ЖСВ, $V_{daf_c} = 14,9 \%$, СКВ = 0,6 %.

у жодній з точкових проб немає перевищення граничного значення плюс допустимої похибки аналізу виходу летких речовин 4 % відносних. Після проходження конвеєрів подачі палива на виробництво, пересипів та БСВ однорідність паливної суміші значно покращується.

У I півріччі 2016 р. на блоки 200 МВт подавалася виключно вугільна суміш, на блоки 300 МВт (котли ТПП-210, ТПП-210А) – пісне вугілля або вугільна суміш.

На рис.10 наведено частку блоків 300 МВт у паливоспоживанні ТЕС та частку вугільної суміші в ньому. Ця частка зростала по мірі вичерпання запасів пісного вугілля на складі ТЕС та в червні 2016 р. перевищила 91 %.

На всіх котлоагрегатах, де спалювалася вугільна суміш, відзначалося суттєве покращення витікання рідкого шлаку, в тому числі на низьких навантаженнях, внаслідок більш стійкого займання суміші порівняно з антрацитом при нижчих, ніж у кузнєцького та південно-африканського пісного вугілля, температурах плавкості золи. При цьому температури топкових газів не перевищували безпечні межі за умовами шлакування, а відхідних газів – нормативні рівні для котлоагрегатів. Це дало змогу на нічних розвантаженнях зменшувати навантаження блоків до 65 % без підсвічування.

Оскільки температура відхідних газів при спалюванні суміші не перевищує нормативні рівні для котлоагрегатів, основним техніко-економічним показником спалювання суміші порівняно з антрацитом та пісним вугіллем є рівень механічного недопалу. На рис.11 цей рівень, розрахований помісячно за даними звітності 3-тех-ТЕС для різних груп блоків з урахуванням калорійності вугілля, його частки

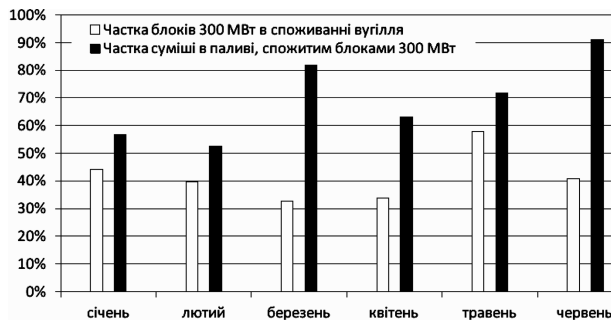


Рис.10. Частка блоків 300 МВт у паливоспоживанні Зміївської ТЕС та частка вугільної суміші в їх паливоспоживанні.

у використаному паливі та вмісту горючих у виносі, наведений у залежності від виходу легких речовин суміші.

З наведених даних видно, що для блоків 200 МВт рівень механічного недопалу (4,4–6,9 %) не перевищує характерний для спалювання суміші антрациту та пісного вугілля в попередні роки та не має явної залежності від виходу легких речовин суміші. Таким чином, спалювання вугільної суміші на котлах блоків 200 МВт у цілому є більш економічним, ніж антрациту та його суміші з пісним вугіллям.

Для блоків 300 МВт рівень механічного недопалу більший (6,4–11,6 %) та зростає із збільшенням виходу легких речовин суміші. Попередній аналіз показує, що причина полягає в різному розподілі повітря на котлах ТП-100 та ТПП-210, ТПП-210А. Справа в тому, що на цих котлах витрата відпрацьованого сушильного агента (повітря) до скидних пальників становить близько 30 % від стехіометричної. Коефіцієнт надлишку повітря в режимному перетині котлів ТП-100 утримується на рівні 1,3–1,4, котлів ТПП-210, ТПП-210А – на рівні 1,2–1,3. З урахуванням присмоктів холодного повітря в топку на рівні не менше ніж 10 % сума первинного та вторинного повітря до основних пальників на котлах ТП-100 стано-

вить 0,9–1,0 від стехіометричної. Оскільки на основні пальники спрямовується 85–90 % пилу (решта крізь циклон надходить до скидних пальників), у них існує надлишок повітря порівняно зі стехіометрично необхідним та відбувається згадана вище компенсація зниження швидкості горіння антрациту у збідненому киснем середовищі за рахунок збільшення температури факелу. На котлах ТПП-210, ТПП-210А сума первинного та вторинного повітря до основних пальників становить 0,8–0,9 від стехіометричної. В умовах недостачі повітря збільшення температури факелу не в змозі компенсувати зниження швидкості горіння антрациту у збідненому киснем середовищі.

Звідси випливає, що при в цілому задовільних техніко-економічних показниках на котлах блоків 300 МВт існують додаткові резерви теплової економічності при спалюванні суміші антрациту з газовим вугіллям за рахунок перерозподілу повітря між основними та скидними пальниками. На цей час на ТЕС розглядаються пропозиції ІВЕ НАН України про зменшення витрати відпрацьованого сушильного агента на скидні пальники за рахунок організації рециркуляції з виходу млинового вентилятора на вхід млина та за рахунок спрямування частини відпрацьованого сушильного агента на основні пальники. Їх реалізацію намічено в рамках найближчого планового ремонту котла блоку № 7.

Висновки

Наведені матеріали свідчать про те, що в умовах скорочення поставок донецького антрациту та пісного вугілля вперше у світі вдалося вирішити науково-практичні проблеми, організувати шихтування однорідної суміші антрациту з 27–32 % газового вугілля на складі Зміївської ТЕС, а також її безпечно та ефективно спалювання на котлах ТП-100, ТПП-210, ТПП-210А з режимними характеристиками та експлуатаційними показниками, які не відрізняються від характерних для донецького пісного вугілля. Для державних вугільних підприємств це дало додатковий обсяг збуту, а для ТЕС суттєво розширило паливну базу, дало змогу на нічних розвантаженнях зменшувати навантаження блоків до 65 % без підсвічування за рахунок більш стійкого займання та горіння паливної суміші порівняно з антрацитом. Це дозволило успішно закінчити зимовий сезон 2015–2016 рр., підготуватися до нинішнього зимового сезону. Загальне використання газового вугілля у складі паливної суміші на Зміївській ТЕС у 2006 р. очікується до 400 тис. т. У сучасних умовах браку коштів на реконструкцію котлоагрегатів застосування паливної суміші

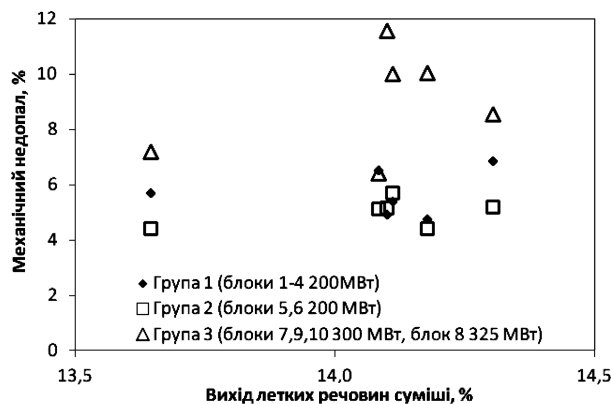


Рис.11. Механічний недопал по групах котлоагрегатів у залежності від виходу легких речовин суміші.

можно рекомендувати й для інших ТЕС, що спалюють антрацит та пісне вугілля та потерпають від їх дефіциту.

Список літератури

1. Чернявський М.В. Сучасні проблеми паливозабезпечення та паливоспоживання ТЕС України // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2015. — № 3. — С. 5–19.
2. Чернявский Н.В. Топливообеспечение и топливопотребление ТЭС Украины : История, современное состояние, проблемы внедрения рынка энергетического угля // Новини енергетики. — 2015. — № 11. — С. 26–29.
3. Чернявский Н.В., Рохман Б.Б., Провалов А.Ю., Косячков А.В. Опыт сжигания импортных углей в котлоагрегатах ТЭС и ТЭЦ // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2015. — № 4. — С. 15–23.
4. Дедов В.Г., Коземко О.М., Ачкасов Е.М., Чернявский М.В. та ін. Досвід експериментального спалювання вугілля Г/А на Трипільській ТЕС // Энергетика та електрифікація. — 2010. — № 3. — С. 49–55.
5. Чернявский Н.В., Голенко И.Л., Филиппенко Ю.Н., Рудавина Е.В. Опыт сжигания топливных смесей на ТЭС Украины и требования к их составлению // Современная наука. — 2010. — № 3. — С. 104–108.
6. Чернявский Н.В., Провалов А.Ю., Голенко И.Л. Составление и сжигание топливных смесей на ТЭС Украины // Исследования и опыт сжигания топлив : Сб. докл. V науч.-практ. конф. «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы» (Челябинск, 7–9 июня 2011 г.). — Челябинск : ОАО «ИЦЭУ», 2011. — Т. 1. — С. 162–169.
7. Филиппенко Ю.Н., Скляр П.Т., Харлова Е.В., Рудавина Е.В., Чернявский Н.В. Подготовка угольного топлива для пылевидного сжигания на тепловых электростанциях // Збагачення корисних копалин. — 2013. — Вип. 53.
8. Безценний І.В., Бондзик Д.Л., Чернявський М.В., Дунаєвська Н.І. Розрахунок динаміки вигорання сумішей антрациту та газового вугілля для випадку потокового реактора // XII Міжнар. наук.-практ. конф. «Вугільна теплоенергетика : Шляхи реконструкції та розвитку», Київ, 21–24 вер. 2016 р. — Київ : Ін-т вугільних енерготехнологій НАН України, 2016. — С. 128–130.
9. Майстренко О.Ю. Основні закономірності горіння та газифікації високозольного вугілля в різних модифікаціях киплячого шару : Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Київ, 1999. — 35 с.
10. Чернявський М.В., Провалов О.Ю., Безценний І.В. Особливості паливозабезпечення ТЕС і ТЕЦ України в сучасних умовах. Розробка і впровадження методів пилевидного спалювання непроєктних палив і паливних сумішей // XII Міжнар. наук.-практ. конф. «Вугільна теплоенергетика : Шляхи реконструкції та розвитку», Київ, 21–24 вер. 2016 р. — Київ : Ін-т вугільних енерготехнологій НАН України, 2016. — С. 84–88.

Надійшла до редакції 10.10.16

Чернявський Н.В.¹, канд. техн. наук, Провалов А.Ю.¹, канд. техн. наук, Безценний І.В.¹, Моисеєнко О.В.²

¹ *Інститут угольних енерготехнологій НАН України, Київ*

ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: mchernyavski@yandex.com

² *Технический комитет Украины стандартизации ТК 92 «Уголь и продукты его переработки», Киев*

ул. Гната Юры, 9, оф. 34, 03148 Киев, Украина, e-mail: tcu92.kiev@ukr.net

Разработка методов, опыт приготовления смеси антрацита с газовым углем и ее пылевидное сжигание на Змиевской ТЭС

В условиях сокращения поставок донецкого антрацита и тощего угля вследствие боевых действий на востоке Украины впервые в мире удалось решить научно-практические проблемы, организовать шихтование однородной смеси антрацита с 27–32 % газового угля на складе Змиевской ТЭС, а также ее безопасное и эффективное сжигание на котлах ТП-100, ТПП-210, ТПП-210А с режимными характеристиками и эксплуатационными показателями, не отличающимися от характерных для донецкого тощего угля. Для государственных угольных предприятий это дало дополнительный объем сбыва, а для ТЭС существенно расширило топливную базу, позволило на ночных разгрузках снижать нагрузку блоков до 65 % без подсветки за счет более стойкого воспламенения и горения угольной смеси по сравнению с антрацитом. *Библ. 10, рис.11.*

Ключевые слова: антрацит, тощий уголь, газовый уголь, смесь, однородность, выход летучих веществ, опробование, пылевидное сжигание, котлоагрегат, пылесистема.

**Chernyavskiy M.V.¹, Candidate of Technical Sciences, Provalov O.Yu.¹,
Candidate of Technical Sciences, Bezcennyj I.V.¹, Moyiseenko O.V.²**

**¹ Coal Energy Technology Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
19, Andriyivska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: mchernyavski@yandex.com**

**² Ukraine Technical Committee for Standardization TC 92 «Coal and products of
its processing», Kiev**

9, Gnat Yura Str., 03148 Kiev, Ukraine, e-mail: tcu92.kiev@ukr.net

Development of Methods and Practical Experience in the Preparation and Pulverized Combustion of Anthracite and Bituminous Coal Mixture at Zmiev TPP

With the decline in the supply of Donetsk anthracite and semi-anthracite as a result of fighting in the east of Ukraine, for the first time in the world it managed to solve scientific and practical problems and to organize producing of homogeneous mixture of anthracite with 27–32 % bituminous coal at Zmiev TPP fuel stock, as well as safe and effective mixture combustion in TP-100, TPP-210, TPP-210A boilers with performance characteristics and technical and economic indicators not different from those of the Donetsk semi-anthracite. For state-owned coal enterprises it gave additional volume of sales, and for thermal power plant it has significantly expanded fuel base, made it possible to reduce the night unloading unit loads of down to 65 % without oil or gas addition due to more stable ignition and combustion of coal mixture compared with anthracite. *Bibl. 10, Fig. 11.*

Key words: anthracite, semi-anthracite, bituminous coal, mixture, homogeneity, volatile yield, sampling, pulverized combustion, boiler, coal-pulverization system.

References

1. Chernyavskiy M.V. [Modern problems of fuel supply and fuel consumption at TPPs in Ukraine], *Jenergotehnologii i resursosberezhennie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2015, (3), pp. 5–19. (Ukr.)
2. Chernyavskiy N.V. [Fuel supply and fuel consumption at TPPs in Ukraine: history, current status and problems of introduction of steam coal market], *Novini energetiki [Energy news]*, 2015, (11), pp. 26–29. (Rus.)
3. Chernyavskiy N.V., Rohman B.B., Provalov A.Ju., Kosjachkov A.V. [Experience of imported coals burning in TPP and CHP boilers], *Jenergotehnologii i resursosberezhennie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2015, (4), pp. 15–23. (Rus.)
4. Djedov V.G., Kozemko O.M., Achkasov Je.M., Chernyavskiy M.V. [Experience of experimental anthracite and bituminous coal mixture (G/A) burning for Tripilska TPP], *Energetyka ta elektrifikacija [Energy and Electrification]*, 2010, (3), pp. 49–55. (Ukr.)
5. Chernyavskiy N.V., Golenko I.L., Filippenko Ju.N., Rudavina E.V. [Experience of fuel mixtures burning at TPPs in Ukraine and the requirements for their preparation], *Sovremennaja nauka [Modern Science]*, Dnipropetrovsk : Triacon, 2010, (3), pp. 104–108. (Rus.)
6. Chernyavskiy N.V., Provalov A.Ju., Golenko I.L. [Preparation and burning of fuel mixtures at TPPs in Ukraine], *Issledovaniya i opyt szhiganiya topliv : Sb. dokl. 5th nauchno-prakt. konf. «Mineral'naja chast topliva, shlakovanie, ochistka kotlov, ulavlivanie i ispolzovanie zoly» [Research and experience of burning fuels: Papers of 5th Conf. «Mineral part of fuel»]*, Cheljabinsk, 7–9 June, 2011, Cheljabinsk : Urals Power Engineering Center, 2011, 1, pp. 162–169. (Rus.)
7. Filippenko Yu.N., Skljar P.T., Harlova E.V., Rudavina E.V., Chernyavskiy N.V. [Preparation of coal fuel for pulverized combustion at thermal power plants], *Zbagachennija korisnih kopolin [Mineral processing]*, 2013, Iss. 53. (Rus.)
8. Bezcennyj I.V., Bondzyk D.L., Chernyavskiy M.V., Dunajevs'ka N.I. [Calculation of the burning dynamics of anthracite and bituminous coal mixtures in the case of streaming reactor], *12th Mizhmar. nauk.-prakt. konf. «Vugil'na teploenergetyka : Shljahy rekonstrukcii' ta rozvytku» [«Coal thermal power: ways for reconstruction and development»]*, Kiev, 21–24 Sept. 2016, Kiev : Institut vugil'nyh energoteknologij NAN Ukrainy, 2016, pp. 128–130. (Ukr.)
9. Majstrenko O.Ju. [Basic laws of combustion and gasification of high-ash coal in different modifications of fluidized bed] : Avtoref. dys. ... dokt. tehn. nauk, Kiev, 1999, 35 p. (Ukr.)
10. Chernyavskiy M.V., Provalov O.Ju., Bezcennyj I.V. et al. [Features of the fuel supply TPPs and CHPs in Ukraine in modern conditions. Development and implementation of methods of non-project fuels and fuel mixtures pulverized combustion], *12th Mizhmar. nauk.-prakt. konf. «Vugilna teploenergetyka : Shljahy rekonstrukcii ta rozvytku» [«Coal thermal power: ways for reconstruction and development»]*, Kiev, 21–24 Sept. 2016, Kiev : Institut vugil'nyh energoteknologij NAN Ukrainy, 2016, pp. 84–88. (Ukr.)

Received October 10, 2016