



<https://doi.org/10.15407/scin16.05.086>

**Н.І. ДУНАЄВСЬКА, Д.Л. БОНДЗИК,
М.М. НЕХАМІН, Є.С. МІРОШНІЧЕНКО, І.В. БЕЗЦЕННИЙ,
В.Я. ЄВТУХОВ, Т.С. ЩУДЛО**

Інститут вугільних енерготехнологій Національної академії наук України,
вул. Андріївська, 19, Київ, 04070, Україна,
+380 44 425 5068, ceti@i.kiev.ua

ТЕХНОЛОГІЯ СПІЛЬНОГО СПАЛЮВАННЯ АНТРАЦИТУ ТА ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА В ПИЛОВУГІЛЬНИХ КОТЛАХ ТЕС І ТЕЦ

Вступ. Світовий досвід дає багато прикладів високоефективного використання біомаси для вироблення тепла та електроенергії в вугільних котлоагрегатах. Проте для України, яка має значні поклади вугілля та потенціал твердої рослинної біомаси, така технологія досі не реалізована.

Проблематика. Пошук нових непроектних палив для теплової енергетики у зв'язку з дефіцитом вугілля антрацитової групи є актуальним завданням, зважаючи на зобов'язання України збільшити виробництво енергії із відновлюваних джерел та необхідністю виконувати жорсткі європейські норми за викидами.

Мета. Розроблення оптимальних технологічних та режимних умов зі спільного спалювання вугілля антрацитової групи та твердої біомаси.

Матеріали і методи. Об'єктами досліджень були пилоподібне вугілля українських покладів та тверда рослинна біомаса. Використано експериментальні методи досліджень на лабораторних та пілотних установках, а також CFD-моделювання.

Результати. Досліджено режими горіння суміші вугілля та біомаси; розроблено оптимальну схему її використання на пиловугільних котлах ТПП-210А; виконано балансовий розрахунок пальника при спільному спалюванні антрациту та твердого біопалива; виконано проектування пальникового пристрою для котлів ТПП-210А та підготовлено ескізний проєкт. Розроблений проєкт може бути використано на котлах ТПП-210А, а з невеликими змінами — на більшості котлів, які спалюють антрацит та пісне вугілля.

Висновки. Застосування 8–12 % біомаси за теплом здатне суттєво інтенсифікувати процеси горіння вугілля антрацитової групи. Рекомендована схема подавання біомаси до паливни — з окремого бункеру пелет через подрібнювач до пальника, де вводиться до паливни трубопроводом з конусним розсікачем на виході. 3D-моделювання спільного горіння показало зростання температури потоку й ступеню вигорання палива. Виконано ескізний проєкт пальника котла ТПП-210А для спільного спалювання антрациту та 10 % частки біомаси.

Ключові слова: теплові електростанції, біопаливо, вугілля, спільне спалювання.

Цитування: Дунаєвська Н.І., Бондзик Д.Л., Нехамін М.М., Мірошніченко Є.С., Безценний І.В., Євтухов В.Я., Щудло Т.С. Технологія спільного спалювання антрациту та твердого біопалива в пиловугільних котлах ТЕС і ТЕЦ. *Nauka innov.* 2020. Т. 16, № 5. С. 86–96. <https://doi.org/10.15407/scin16.05.086>

Паливна безпека та екологічний стан довкілля є одними з пріоритетних завдань для успішного розвитку країни. Вугільні ТЕС виробляють в Україні до 37 % електроенергії. В останні роки через низку причин зменшується доступність викопних енергетичних палив (газ закуповується в обмежених кількостях, антрацит і пісне вугілля стали дефіцитними через проведення антитерористичної операції на сході України).

У західних країнах Європи, Північної Америки, Азії останніх два десятиліття усе більше залучають до паливної бази енергетики альтернативні тверді палива (рослинну біомасу) для спільного спалювання з вугіллям на факельних котлоагрегатах та котлоагрегатах киплячого шару [1, 2]. Але характеристики цих твердих палив суттєво залежать від місцевих умов. Тому досвід західних країн прямо не може бути застосовано для вітчизняної енергетики і потребує адаптації.

В Україні біомасу використовують тільки в малій енергетиці для систем опалювання та гарячого водопостачання. Для блоків потужністю 200–300 МВт досвіду використання біомаси немає. Тому для впровадження технологій спільного спалювання різних видів твердого палива виникла необхідність провести дослідження особливостей взаємного впливу при їх спільному горінні.

На шляху до членства у Європейському співтоваристві Україна прийняла на себе зобов'язання щодо виконання рішень екологічних конвенцій, що суттєво обмежує використання викопних і стимулює попит на альтернативні поновлювані види палива.

Біомаса є одним з найперспективніших джерел, що забезпечує 4 % потреби людства у первинній енергії. 72 % біомаси, що використовується для енергетичних цілей, складає тверда біомаса. На сьогодні частка поновлюваних палив в енергетичному балансі України дуже мала. У низці країн Західної Європи, особливо в скандинавських країнах, вона вже перевищує 20 %.

Серед різновидів енергетичного використання твердої біомаси широке розповсюдження набула технологія спільного спалювання біомаси з вугіллям (ССБВ) в факелі, що зумовлено високою ефективністю спалювання внаслідок максимальної теплонапруженості топкового об'єму пиловугільних котлоагрегатів та їх поширеністю у світі. Сьогодні 243 котлоагрегати в світі спалюють спільно біомасу з вугіллям, з яких 93 – пиловугільні. Активно ведуться розробки в галузі вдосконалення технологій спалювання з використанням поновлюваних палив [3, 4]. Значну увагу приділено проблемам підвищення надійності агрегатів для спалювання різних видів біомаси та відходів. Найпоширеніші схеми організації зазначеного процесу в пиловугільному котлі є спільне подрібнення та спалювання біомаси з вугіллям, окрема підготовка біомаси та її спалювання у комбінованому або окремому пальнику та попередня газифікація біомаси з наступним її спалюванням в котлі [5, 6].

Зазначений вид палива не є проєктним для більшості котлів українських ТЕС, тому він вимагає значного обсягу досліджень характеристик горіння, а також визначення впливу біомаси на вугілля в процесах їхнього спільного спалювання. Це дозволить визначити оптимальні співвідношення видів палива та режими горіння, які дозволять зменшити загальну вартість палива, знизити шкідливі викиди та буде сприяти енергетичній незалежності країни.

Аналіз досвіду, накопиченого у всьому світі в результаті комерційної експлуатації технології спільного спалювання на теплових електростанціях дозволяє зробити наступні висновки:

- ◆ спільне спалювання біомаси з кам'яним вугіллям, бурим вугіллям і торфом у традиційних парових котлах надає унікальну можливість, комбінуючи утилізацію поновлюваних джерел енергії і викопних видів палива, отримати найбільшу вигоду від обох видів палива;
- ◆ додавання біомаси у паливний баланс дозволяє суттєво знизити викиди вуглекислого

- го газу, скоротити викиди інших забруднюючих речовин у ґрунт та повітря;
- ◆ при спільному спалюванні біомаси у пило-вугільних котлах можна легко замінити до 10 % вугілля спаленого у котлі з незначними змінами обладнання, що вкрай важливо, враховуючи українські обмежені можливості інвестувати у модернізацію обладнання. Це також є перспективним варіантом для спільного спалювання українського антрациту, оскільки надмірний вміст летких речовин в біомасі може компенсувати дефіцит летких речовин у вугіллі;
 - ◆ використання біомаси в енергетиці України детально не досліджувалося. Відсутня база даних щодо характеристик рослинної біомаси в Україні.

Для проведення досліджень з визначення оптимальних співвідношень біомаси та вугілля використано експериментальну установку, що моделює процеси, які відбуваються в припальниковому просторі та нижній реакційній частині (НРЧ) паливні. В Інституті вугільних енерготехнологій (ІВЕ) Національної академії наук України функціонує унікальна пілотна установка, яка дозволяє проводити спалювання пилоподібного твердого палива в потоці, забезпечуючи температури до 1700 °С. На ній

встановлено системи подавання різних видів палив: шнековий живильник біомаси, барабаний живильник вугільного пилу та систему підведення природного газу. У роботі [7] наведено детальний опис установки та методики балансових експериментів з відпрацюванням спільного спалювання різних видів палива.

Аналіз технічних характеристик досліджуваних видів палива наведено в табл. 1, а їхній елементний склад — в табл. 2. Для другого зразка вугільного пилу не вдалося отримати повний елементний аналіз та плавкість золи. Хоча первинно було заплановано проведення дослідження спільного спалювання біомаси та антрациту (як характерного і проектного палива для Трипільської ТЕС та ряду інших), за короткий термін кон'юнктура вугільного ринку різко змінилася (блокування території ОРДЛО, санкційні закони) і у другій половині 2017 р. на складах українських ТЕС, які за проектом мають спалювати вугілля антрацитової групи, антрацит було практично вичерпано. Запити на ТЕС та дві взяті проби вугільного пилу на станції показали, що на той момент основним паливом для антрацитових ТЕС було пісне вугілля різної зольності (вихід летких продуктів на горючу масу (V^{laf}) — до 18 %_{вар}) (табл. 1). Перший зразок вугілля мав дуже високу золь-

Таблиця 1. Технічний аналіз досліджуваних видів палива

Паливо	Загальна волога на робочий стан палива, W_t^r , %	Зольність на сухий стан палива, A^d , %	Загальна сірка на сухий стан палива, S_t^d , %	Вихід летких речовин, V^{laf} , %	Плавкість золи, °С			Теплота згоряння	
					t_A	t_B	t_C	Нижча, Q_i^r	
								МДж/кг	ккал/кг
Пелета сосни	8,7	0,4	0,03	85,9	1300	1310	1325	17,63	4211
Агropелета (солома агрокультур)	8,4	6,1	0,14	82,0	1180	1200	1225	15,57	3720
Пелета лущиння соняшника	9,3	9,7	0,18	80,3	1100	1110	1200	14,81	3538
Вугілля станційного помелу (зразок 1)	1,6	36,6	1,19	13,6	1390	>1400	н/д	19,04	4547
Вугілля станційного помелу (зразок 2)	6,0	19,0	н/д	14,7	н/д	н/д	н/д	25,5	6081

Примітка. t_A — температура початку деформації; t_B — температура плавлення напівсфери; t_C — температура рідкоплавкого стану; н/д — не вдалося визначити.

ність (A^d понад 36 %) та високу температуру плавлення золи (температура нормального рідкоплавкого стану для нього більше 1550 °С, що унеможливорює стабільне і надійне спалювання його на пілотній установці ІВЕ). Тому основним видом палива було обрано другий зразок — пісне вугілля із зольністю на суху масу 19,0 %.

Порівняння технічних характеристик палив дозволяє *a priori* передбачити переваги спільного спалювання:

1) суттєво нижча зольність дозволить використовувати як основний вид палива пісне вугілля підвищеної зольності (подібно до досліджуваного вугілля зразку 1), при спалюванні вугілля традиційної зольності (20–24 %) використання біомаси зменшить викиди леткої золи;

2) вміст сірки в біомасі в 5–50 разів менший, ніж у вугіллі, що суттєво зменшує утворення і викиди шкідливого газу SO_2 , відповідно зменшується забруднення оточуючого середовища і плата за викиди для ТЕС;

3) значна кількість горючих летких речовин ($V^{daf} > 80$ %) допомагає займанню вугілля і формально може перевести суміш з вугіллям з марки антрацит в марку пісне;

4) нижча температура плавлення золи може покращити вихід рідкого шлаку;

5) нижчий вміст азоту в горючій масі (до 10 разів) зменшить викиди «паливних» оксидів азоту.

Проте при плануванні експериментів треба враховувати:

1) високий вміст летких речовин може викликати займання біомаси, що вимагає заходів з безпеки в системі складування та транспортування біомаси;

2) низька температура розм'якшення золи пелет лушпиння соняшника ($t_A = 1100$ °С) може призводити до шлакування поверхонь нагрівання котлоагрегату. Необхідна перевірка на реальному котлі;

3) низька теплота згорання біомаси може знизити адіабатну температуру горіння суміші палив, але реальна температура залежатиме від низки факторів (швидкий вихід і згорання летких речовин допомагає займанню вугільного пилу).

Експерименти проводились з кожним видом біомаси — сосна, агропелета та лушпиння соняшника, і різною часткою біомаси в суміші — від 3,5 до 20 %. Їхні результати показали, що:

- ◆ можливо спалювати разом в факельних котлоагрегатах пісне вугілля та подрібнені пелети з біомаси українського походження;
- ◆ додавання біомаси в процесі спалювання вугілля інтенсифікує його займання і підвищує температуру в паливні в безпосередній близькості від пальникового пристрою;
- ◆ частка біомаси понад 15–20 % може призводити до перегріву поверхонь нагрівання нижньої радіаційної частини і вимагатиме реконструкції паливні;
- ◆ оптимальна частка біомаси, яка інтенсифікує спалювання вугілля, але не вимагає суттєвих модифікацій пальникового пристрою та котла складає 8–12 %, тому можна рекомендувати технологічно прийнятну та ефективну частку біомаси в кількості 10 % за теплом від загальної кількості палива.

Таблиця 2. Елементний аналіз досліджуваних видів палива

Паливо	Хлор на сухий стан палива, Cl^d , %	Елементний склад, %				
		C^{daf}	H^{daf}	O^{daf}	N^{daf}	S^{daf}
Пелета сосни	0,04	51,87	6,33	41,63	0,14	0,03
Агропелета (солома агрокультур)	0,27	50,30	6,21	42,81	0,53	0,15
Пелета лушпиння соняшника	0,42	49,35	6,20	43,35	0,89	0,21
Вугілля станційного помелу (зразок 1)	0,62	88,97	3,24	5,63	1,30	0,86
Вугілля станційного помелу (зразок 2)	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	0,84

Примітка. Н/д — визначити вміст речовин не вдалося.

КОНСТРУКЦІЯ ПАЛЬНИКА ДЛЯ СПІЛЬНОГО СПАЛЮВАННЯ

Враховуючи вищенаведене, вибір оптимального співвідношення біомаса/вугілля виконується виходячи з технологічно, екологічно та економічно обґрунтованих показників з метою збереження надійної та безпечної роботи всіх систем вже працюючих котлоагрегатів.

В дослідженні було обрано шлях мінімальної модернізації вихрового пального котла ТПП-210А тепловою потужністю 70 МВт Трипільської ТЕС, в районі розташування якої існує достатня кількість відходів деревообробних підприємств (біомаси) в Київській області на економічно обґрунтованій відстані.

Цей типовий палиник має такі проектні технічні характеристики:

Загальна довжина, м	3,8
Діаметр каналу центрального повітря, м	0,67
Діаметр каналу аеросуміші з первинним повітрям, м	0,96
Діаметр першого каналу вторинного повітря, м	1,3

Діаметр другого каналу вторинного повітря, м	1,5
Проектні витрати повітря, $\text{нм}^3/\text{год}$:	
центрального	2500;
первинного	11500;
вторинного	43200;
всього	57200;
решта	скидне повітря
Температура перед входом в палиник, $^{\circ}\text{C}$:	
повітря	340–360
первинної аеросуміші	220
Розрахункова витрата вугілля при номінальному навантаженні	10,1 т/год
Характеристики вугілля:	
антрацит $A^d = 19,0\%$, $W_t = 7,5\%$, $Q_i = 24,26$ МДж/кг;	
Q_i вугільного пилу при $W_t = 1\%$ складає 25,9 МДж/кг.	

З метою гарантованого проходження біомаси каналом центрального повітря швидкість потоку має складати не менше, ніж 20 м/с. Для цього при забезпеченні подавання біомаси в кількості 10 % за теплом від вугілля з підвищеною концентрацією, витрата біомаси з теплою згорання 4211 ккал/кг на палиник складатиме 1,5 т/год.

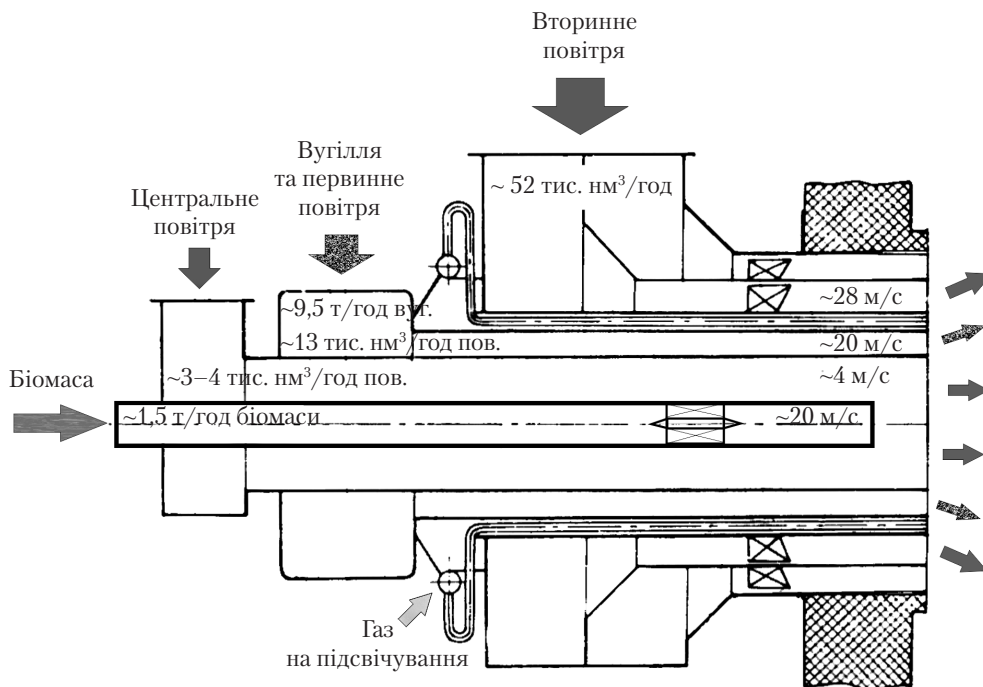


Рис. 1. Палиник для спільного спалювання вугілля з біомасою потужністю 70 МВт котла ТПП-210А

Для забезпечення нагрівання вугілля продуктами спалювання легких біомаси потік біомаси має бути закрученим з параметром кручення $n = 2$ або на виході каналу встановлено розсікач.

В коаксіальний канал, що буде утворений при модернізації паливника для ССБВ, має подаватися повітря з витратою не менше $3000 \text{ м}^3/\text{год}$ (рис. 1).

Регулювання сумарної витрати повітря на паливник залишається без змін і провадиться зміною витрат вторинного повітря.

СХЕМА ПОДАВАННЯ БІОМАСИ ДО КОТЛА ТПП-210А

Зважаючи на високу потужність пиловугільного блоку Трипільської ТЕС та суттєву відмінність в характеристиках вугілля та біомаси, запропоновано забезпечити можливість заміщувати у вузькому діапазоні витрат (до 10 % за теплом) антрациту за рахунок пелет. Передбачено розміщення на ТЕС системи зберігання, транспортування, дозування та подавання пелет з твердої біомаси в усі 12 паливників котла ТПП-210А і необхідним є відпрацювання технічних рішень та демонстрація технології з можливістю її подальшого розвитку в Україні.

Загальну схему системи подавання пелет у паливну котла проілюстровано на рис. 2.

Пиловугільний котлоагрегат ТПП-210А Трипільської ТЕС складається з двох корпусів, у паливні кожного встановлено зустрічно 6 паливників в один ярус. В центральний канал паливників котла передбачено подавання біомаси. Попередньо розглядається варіант організації пневмотранспорту пелет з високою концентрацією із витратного бункера до паливника під розрідженням з використанням парового ежектора. Після живильника пелети можуть бути подрібнені, наприклад, за допомогою млина-вентилятора. В каналі введення біомаси буде підтримуватися постійна витрата повітря, швидкість якого забезпечуватиме стабільне подавання палива, а витрата пелет регулюватиметься за допомогою живильника. Як було показано

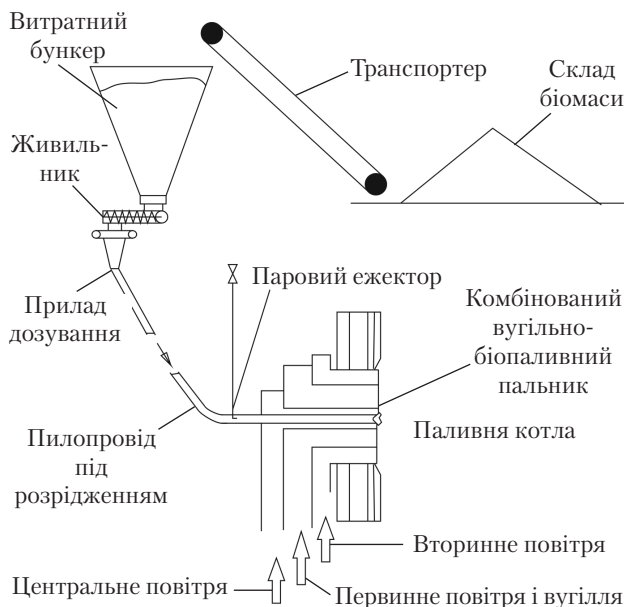


Рис. 2. Схема подавання біомаси в модернізований паливник вище, заміщення 10 % вугілля біомасою вимагатиме витрати подрібнених пелет на кожний паливник $1,5 \text{ т}/\text{год}$. Для забезпечення безперервного подавання біомаси протягом 8 год у один паливник і насипній щільності біомаси $0,7 \text{ кг}/\text{м}^3$, об'єм витратного бункера повинен становити 17 м^3 .

3D-МОДЕЛЮВАННЯ СПІЛЬНОГО СПАЛЮВАННЯ АНТРАЦИТУ Й БІОМАСИ В ПАЛИВНІ КОТЛА ТПП-210А

Одним з методів вивчення впливу додавання біомаси до антрацитового палива на параметри процесу їхнього спільного горіння є чисельне моделювання. У роботі використано загальновідому програму *ANSYS FLUENT*, проте необхідно коротко пояснити певні особливості постановки подібного завдання в цій програмі.

Програма *ANSYS FLUENT*, згідно з її документацією, допускає моделювання спільного спалювання пилу твердого палива з газоподібним або рідким паливом. Можливість включення в модель замість нього іншого твердого палива (що технічно можливо) є нашим при-

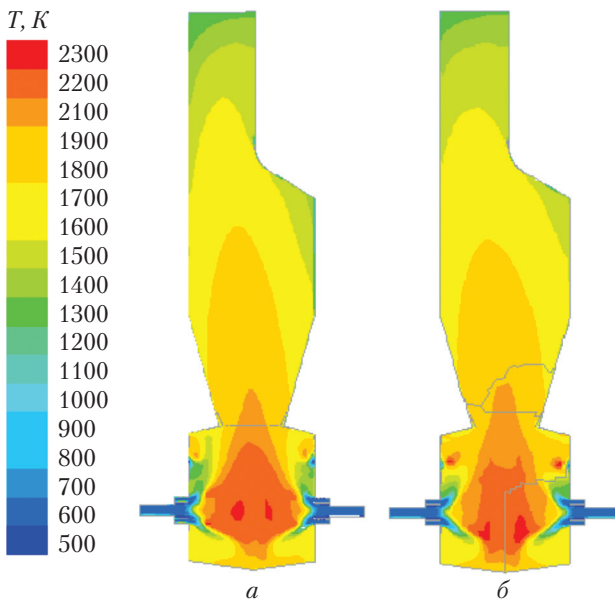


Рис. 3. Поля температур у площині $z = 0$ для варіантів розрахунків паливні без біомаси (а) і з введенням біомаси в аеросуміш (б)

пущенням, яке вимагало попереднього аналізу й підтвердження.

Виконані із цією метою тестові розрахунки з одночасним введенням у розрахункову область антрациту й соснових пелет, дали результати, близькі до очікуваних, що можна інтерпретувати як підтвердження можливості використаного підходу.

Стосовно промислових умов, результати спільного спалювання вугілля й біомаси було розглянуто на прикладі процесів у паливній котла ТПП-210А [8]. Розмір частинок вугілля приймався за розподілом Розин-Рамлера в діапазоні від 5 до 200 мкм при середньому розмірі часток 40 мкм. Розмір частинок пелет — 200 мкм, оскільки збільшення цього параметру різко погіршує вигорання пелет. У розрахунках

такий малий розмір може бути виправдано тим припущенням, що через високий відсоток летких сполук (і вологи) при нагріванні в потоці великі частинки пелет, що вводяться, можуть розриватися на більш дрібні. Витрата вугільного пилу задавалася для номінального навантаження, коефіцієнт надлишку окиснювача $\alpha_T = 1,25$, зокрема й присмоки $\alpha_{\text{прис}} = 0,05$. Технічний і елементний аналіз, а також нижчу теплоту згорання використаних у розрахунках антрациту й соснових пелет наведено в табл. 3.

У режимах з подачею пелет витрата останніх обиралася, виходячи зі збереження теплової енергії палива стосовно режиму без пелет, при відношенні тепла, внесеного вугіллям і пелетами як 9:1. Витрата окислювача визначалася зазначеними вище значеннями коефіцієнта надлишку окислювача з урахуванням відмінності його необхідної кількості для згорання вугілля й пелет. Кут крутки становив для центрального повітря 20 градусів, для аеросуміші й вторинного повітря, відповідно, 25 і 50 градусів.

У розрахунках було випробувано кілька варіантів місця подавання пелет: по осі центрального повітря пальників на розсікачі, разом з аеросумішшю, у скидні сопла й нижче пальників. Детально розглянуто вплив місця введення біомаси на поля температур в передтопку, інтенсивність вигорання, концентрацію кисню, поля швидкості потоку. З результатів випливає, що ріст середньомасової температури потоку на виході розрахункової області на 35–40 °С при подачі пелет практично не залежить від місця їх введення в передтопок. Слабко змінюється при цьому й концентрація кисню на виході. Найбільш істотний вплив місце

Таблиця 3. Характеристики антрациту й пелет

Вид палива	Технічний аналіз, %				Елементний склад, %					Теплота згорання
	A^r	W^r	V^r	C^r	C^e	H^e	O^e	N^e	S^e	Q_i^r , МДж/кг
Антрацит	19	7,5	4	69,5	68,00	1,45	1,90	0,58	1,57	24,23
Пелети	0,365	8,7	78,43	12,51	47,17	5,756	37,86	0,127	0,027	17,63

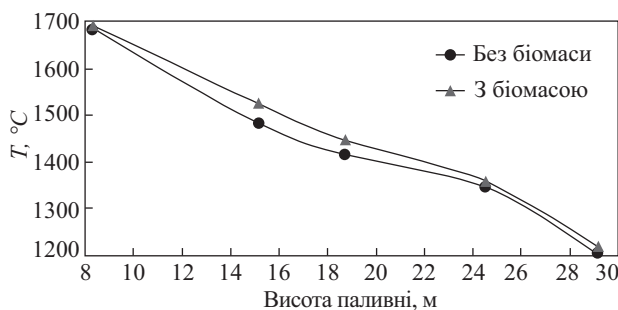


Рис. 4. Зміна осереднених по перетинах температур газової фази по висоті паливни

введення пелет чинить на повноту вигорання антрациту в передтопці. В усіх випадках вона збільшується порівняно з режимом без пелет, але найбільш суттєво, на 2,8 % — при подаванні пелет у скидні сопла. Однак, у цьому варіанті відзначено й найменше вигорання коксу пелет. Хоча ця обставина, імовірно, не повинна бути вирішальною при виборі місця введення пелет оскільки, по-перше, як видно з табл. 2, у пелетах мало коксового залишку (а їхні леткі речовини в усіх варіантах згорають повністю), а по-друге, у цьому випадку мова йде про вигорання в НРЧ, а в паливні пелети, як отримано при розрахунках, догорають. Загалом виконані розрахунки, на нашу думку, не демонструють явної переваги якого-небудь певного місця введення пелет.

Для розрахунків горіння в паливні вона була розбита на 5 зон, а граничні умови — середні температури стінок і їхні коефіцієнти випромінювання, використано за результатами позонного розрахунку паливни за нормативним методом. Для 1–5 зон вони склали 849–1372 °C та 0,68–0,75. Розрахунки параметрів у паливні виконані для варіантів без введення в потік біомаси й з її введенням в аеросуміш. Наведені на рис. 3 відповідні поля температур суттєво не різняться. Розподіли температур потоку по висоті паливни (рис. 4) теж досить близькі, хоча з подаванням біомаси дещо збільшуються. Вигорання коксового залишку при подаванні біомаси практично не змінюється.

Отже, виконане чисельне моделювання процесів у паливні котла ТПП-210А при спалюван-

ні антрациту й антрациту в суміші з пелетами, на нашу думку, підтверджує певні переваги використання суміші.

ЕСКИЗНИЙ ПРОЄКТ ПАЛЬНИКА

Основною умовою до виконання проєктних робіт є збереження наявної інфраструктури і конструкції основних елементів пальника. Відповідно до попередніх досліджень за умовами займання і спільного спалення подрібненої твердої біомаси та антрациту є організація окремого каналу подавання біомаси в межах існуючих пальників.

Зі складу біопалива подрібнена пелета подається на виробництво в обсягах, що визначені відповідними розрахунками.

Для транспорту використовується закритий шнековий транспортер з гнучким шнеком, або стрічкові конвеєри, або пневмотранспорт високої концентрації.

У бункерно-деаераторному приміщенні у вільному об'ємі встановлюється витратний бун-

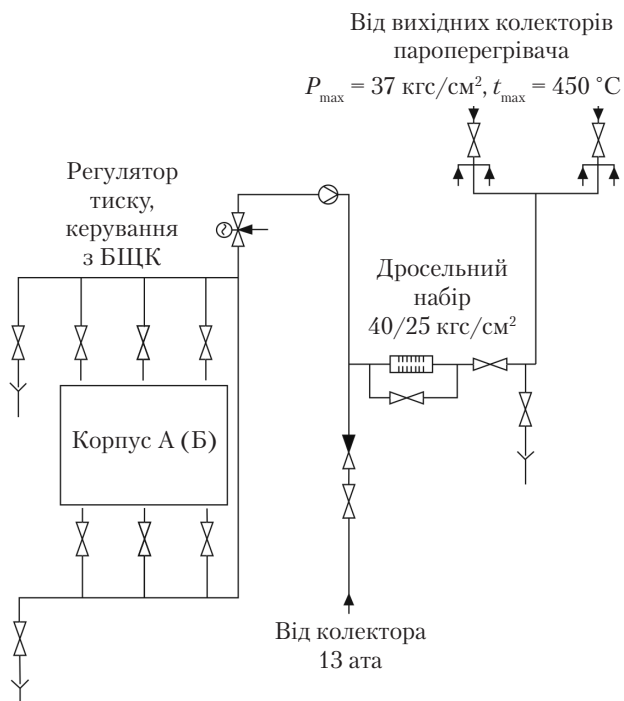


Рис. 5. Система подачі пари на транспорт твердого біопалива

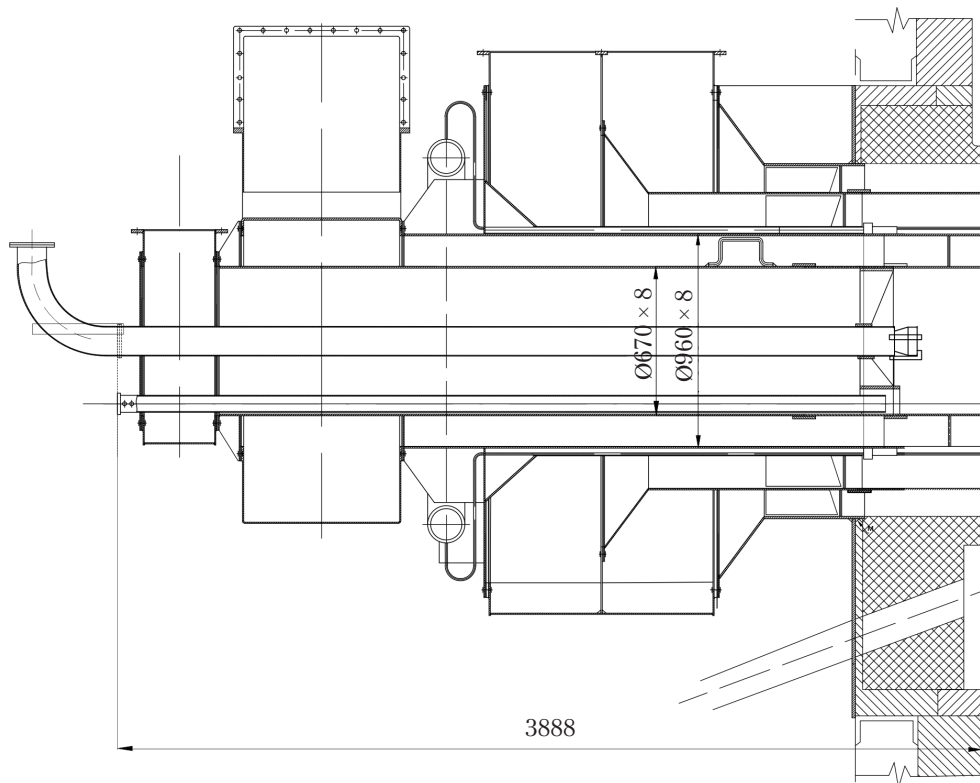


Рис. 6. Ескізний проект пальника котлоагрегата ТПП-210А, модернізований для спільного спалювання антрациту та 10 % частки біомаси

кер, його об'єм розраховано у рамках окремої роботи з логістики та транспорту біомаси.

Дозування біопалива з витратного бункеру відбувається за допомогою шнекових живильників, які приводяться до дії електричними двигунами зі змінним числом обертання. Регулювання числа обертання живильників відбувається за допомогою перетворювачів частоти. Система керування живильниками інтегрується з автоматичною системою керування технологічними процесами (АСК ТП) енергоблоку та відбувається з блочного щита керування.

Кількість живильників може відповідати кількості пілопроводів, по 6 на корпус. З метою економії простору котельного цеху та капітальних затрат може бути прийнято схему з подачею на 2 пілопровода від одного живильника.

Подача біомаси до пальника, згідно технічного рішення, що описано вище, здійснюється

за допомогою парового ежектора та транспорту повітрям з підвищеною концентрацією.

Приблизну схему подачі пари на ежектори системи транспорту твердого біопалива наведено на рис. 5. Менший діаметр не забезпечить надійного проходження часток біопалива та створить умови забиття проводів біомаси. Відбір пари на транспорт твердого біопалива здійснюється з колекторів проміжної ступені промперегріву. Резервним джерелом пари є загальностанційний колектор власних потреб (тиск — 13 ата). Для отримання заданих параметрів пари передбачено встановлення дистанційного електричного регулятора тиску пари на транспорт пилу. Витрата пари на 1 пальник може становити близько 70 кг/год. В кінці вихідної труби необхідно встановити розсікач з тугоплавкого металу.

Система подачі біомаси, згідно рішення інтегрується до каналу центрального повітря,

збоку від основної мазутної форсунки. Система керування регулятором тиску пари, давачі тиску пари та розрідження в пилопроводах, температури пилопроводів заведено на блочну АСК ТП.

Ескіз пальника котлоагрегата ТПП-210А, модернізованого для спалювання антрациту та 10 % частки твердого біопалива наведено на рис. 6.

ВИСНОВКИ

1. Світовий досвід спільного спалювання біомаси та вугілля газової групи показує можливість використання для цього працюючих пиловугільних котлів із збереженням можливості їхньої роботи як виключно на вугіллі, так і з швидким перемиканням на спільне спалювання з біомасою.

2. При використанні біомаси не більше 20 % за теплом для переведення на спільне спалювання вугілля з біомасою не вимагається суттєвих реконструкцій котла і капітальних витрат.

3. Проведені експерименти показали, що застосування 8–12 % біомаси за теплом здатне суттєво інтенсифікувати процеси горіння вугілля антрацитової групи.

4. Рекомендована схема подавання біомаси до паливни — з окремого бункеру пелет через спеціальний млин трубопроводом з підвищеною концентрацією до пальника, де вводиться до паливни трубою з конусним розсікачем на виході.

5. Проведене 3D-моделювання спільного горіння вугільного пилу та біомаси показало зростання температури потоку та вигорання палива.

6. Виконано ескізне проектування пальника котла ТПП-210А для спільного спалювання антрациту та 10 % частки біомаси з мінімальними змінами в самому пальнику.

7. Розроблений проєкт може бути впроваджено на будь-яких електростанціях з котлоагрегатами ТПП-210А, а з невеликими змінами — на більшості станцій, які спалюють антрацит та пісне вугілля.

Робота отримала подальший розвиток, що відображено в публікаціях 2018 року [9–11].

Стаття містить експериментальні результати та технічні розробки, отримані в Інституті вугільних енерготехнологій НАН України при виконанні науково-технічного інноваційного проєкту «Розробка технології та пальника для спільного спалювання антрациту та твердого біопалива в котлах ТПП-210а Трипільської ТЕС».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дунаевская Н.И., Засядько Я.И., Шупик И.С. Технологии совместного сжигания биомассы и угля в пылеугольных топках. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2007. № 3. С. 3–8.
2. Дунаевська Н.І., Вольчин І.А., Засядько Я.І., Потапов А.А., Шудло Т.С. Досвід впровадження спільного спалювання вугілля з біомасою на існуючих енергетичних котлоагрегатах. *Новини енергетики*. 2011. № 12. С. 34–43.
3. Yao Yao, Sheng-Li Meng, Xuan Qi, Wei-guo Yao. TG-Curve Fitting Study of Biomass-Coal Co-Combustion. *International Conference on Electronic, Control, Automation and Mechanical Engineering*. (Nov. 19–20, 2017, Sanya, China). P. 743–748. URL: <http://dpi-proceedings.com/index.php/dtetr/article/view/18486/17985> (дата звернення: 26.11.2019).
4. Ho Young Park, Yoon Hwa Park, Young Joo Kim, Hyun Hee Kim, Sang Bin Park. The Interaction of woody biomass with bituminous coal in their blends. *Environmental Engineering Research*. 2017. V. 22, no. 3. P. 320–328. doi: <https://doi.org/10.4491/eer.2016.159> URL: <http://eeer.org/journal/view.php?number=845>. (дата звернення: 26.11.2019).
5. Mohammad S. Roni, Sudipta Chowdhury, Saleh Mamun, Mohammad Marufuzzaman, William Lein, Samuel Johnson. Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V. 78. October 2017. P. 1089–1101. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.023> (дата звернення: 26.11.2019).
6. Lu G., Yan Y., Cornwell S., Whitehouse M., Riley G. Impact of co-firing coal and biomass on flame characteristics and stability. *Fuel*. 2008. V. 87. P. 1133–1140.
7. Dunaevska N., Chernyavskiy M., Shchudlo T. Co-combustion of solid biomass in pulverized anthracite-coal firing boilers. *Ukrainian Food Journal*. 2016. V. 5, iss. 4. P. 748–764. doi: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2016-5-4-14> (дата звернення: 26.11.2019).

8. Дунаєвська Н.І., Засядько Я.І., Засядько П.Я., Щудло Т.С. Математична модель процесів спільного спалювання біомаси з вугіллям в котлі теплової електростанції. *Електронне моделювання*. 2017. Т. 39, № 3. С. 89–104.
9. Дунаєвська Н.І., Зенюк О.Ю., Коломійченко М.В., Михайлов М.П., Мірошніченко Є.С., Кравець П.П., ..., Подолець Р.З. Спільне факельне спалювання вугілля та біомаси — реальний шлях диверсифікації забезпечення паливом та зниження впливу ТЕС на навколишнє природне середовище. *Енергетика та електрифікація*. 2018. № 6 (416). С. 17–24.
10. Natalya Dunayevska, Yaroslav Zasiadko, Taras Shchudlo. Thermal destruction kinetics of coal and solid biomass mixtures. *Ukrainian Food Journal*. 2018. V. 7, iss. 4. P. 738–752. doi: <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2018-7-4-17> (дата звернення: 26.11.2019)
11. Дунаєвська Н.І., Засядько Я.І., Щудло Т.С. Дослідження кінетики термічної деструкції сумішей вугілля та твердої біомаси. *Електронне моделювання*. 2018. Т. 40, № 5. С. 91–110.

Стаття надійшла до редакції / Received 27.11.19

Статтю прорецензовано / Revised 27.01.20

Статтю підписано до друку / Accepted 17.02.20

*Dunayevska, N.I., Bondzyk, D.L., Nehamin, M.M.,
Miroshnichenko, Ye.S., Beztsennyi, I.V., Evtukhov, V.Ya., and Shudlo, T.S.*

Coal Energy Technology Institute, the NAS of Ukraine,
19, Andriyivska St., Kyiv, 04070, Ukraine,
+380 44 425 5068, ceti@i.kiev.ua

TECHNOLOGY OF ANTHRACITE AND SOLID BIOFUELS CO-FIRING IN PULVERIZED COAL BOILERS OF TPP AND CHP

Introduction. International experience provides many examples of highly efficient use of biomass for heat and electricity production in coal-fired boilers. For Ukraine that has large coal deposits and a potential of solid plant biomass, such technology has not been implemented yet.

Problem Statement. Given the scarcity of anthracite group coal, searching for new non-project fuels for thermal energy is an urgent task in the view of Ukraine's commitment to increase renewable energy production and the need to comply with strict European emission standards.

Purpose. Development of optimal technological and operational conditions for co-firing of anthracite group coal and solid biomass.

Materials and Methods. The objects of research are pulverized Ukrainian coal and solid biomass of plant origin. Experimental research methods with laboratory and pilot plants, as well as CFD modeling have been used.

Results. Blends of coal and biomass burning conditions have been studied; optimal scheme for TPP-210A coal-fired boiler has been recommended; balance calculations in the joint torch that burns anthracite and solid biofuels have been made; according to the chosen design scheme a burner for biomass and coal co-firing for coal-fired boilers TPP-210A have been implemented and preliminary design of the burner has been prepared. The project can be used at any TPP-210A power boiler units, and with minor changes at most boilers that burn anthracite and lean coal.

Conclusions. The use of 8–12% of biomass by heat can essentially intensify the processes of anthracite coal. It is recommended to supply biomass pellets from a separate tank via a special mill to the burner where fuel is injected into the pipeline with a conical divider at output. 3D modeling of co-firing has shown a temperature flow and a fuel burn-out growth. A preliminary design of the boiler burner TPP-210A for co-combustion of anthracite and 10% biomass has been made.

Keywords: thermal power plants, biofuels, coal, and co-firing.