

УДК 662.61

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.187165

## ДОСЛІДЖЕННЯ СПІЛЬНОГО СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА З ПІСНИМ ТА ГАЗОВИМ ВУГІЛЛЯМ

Безценний І. В., Бондзык Д. Л., Дунаєвська Н. І., Нехамін М. М.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО СЖИГАНИЯ ТВЁРДОГО БИОТОПЛИВА С ТОЩИМ И ГАЗОВЫМ УГЛЯМИ

Бесценный И. В., Бондзык Д. Л., Дунаевская Н. И., Нехамин М. М.

## RESEARCH OF CO-COMBUSTION OF SOLID BIOFUEL WITH LEAN AND BITUMINOUS COAL

Beztsennyi I., Bondzyk D., Dunayevska N., Nekhamin M.

*Об'єктом дослідження є процеси термічного перетворення енергетичного вугілля та біомаси, з метою створення високоефективних екологічно чистих технологій його спільного спалювання в паливні котлоагрегатів.*

*Однією з важливих проблем, яка гальмує впровадження спільного спалювання біомаси з вугіллям, є недостатня вивченість взаємодії двох дуже різних твердих палив. Недослідженими залишаються характеристики розмелювання, аеродинаміка частинок, кінетика всіх стадій горіння під час спільного спалювання двох твердих палив. Спільне спалювання біомаси з вугіллям дозволяє частково замінити дефіцитні марки енергетичного вугілля, а також зменшити викиди шкідливих газів та пилу.*

*Для вивчення особливостей спільного спалювання вугілля та біомаси використовувались експериментальні та розрахункові методи дослідження, в тому числі спалювання на потоковій установці, яка призначена для вивчення характеристик горіння пилоподібних палив.*

*Експерименти по спільному спалюванню пісного та газового вугілля із різними видами твердої біомаси показали покращення умов займання вугілля, із додаванням біомаси від 5 до 15 % за теплом. Показано вплив домішки біомаси до вугілля на розподіл температур по довжині факела. В роботі наведені залежності ступеня конверсії газового вугілля та його сумішей з подрібненими пелетами сосни, соломи пшениці та лушпинням соняшника, а також пояснена природа цієї залежності. За газовим аналізом продуктів згоряння показаний вплив домішування біомаси до газового вугілля на утворення оксидів азоту.*

*Отримані висновки та залежності обґрунтовують екологічну доцільність та ефективність спільного спалювання і дозволяють перейти до розробки пілотного проекту часткового заміщення вугілля на різні види твердого біопалива.*

**Ключові слова:** теплові електростанції, пиловугільне спалювання, енергетичне вугілля, тверда біомаса, спільне спалювання.

Объектом исследования являются процессы термического преобразования энергетического угля и биомассы, с целью создания высокоэффективных экологически чистых технологий его совместного сжигания в топке котлоагрегатов.

Одной из важных проблем, которая тормозит внедрение совместного сжигания биомассы с углем, является недостаточная изученность взаимодействия двух очень разных твердых топлив. Неисследованными остаются характеристики размола, аэродинамика частиц, кинетика всех стадий горения во время совместного горения двух твердых топлив. Совместное сжигание биомассы с углем позволяет частично заместить дефицитные марки энергетического угля, а также уменьшить выбросы вредных газов и пыли.

Для изучения особенностей совместного сжигания угля и биомассы использовались экспериментальные и расчетные методы исследования, в том числе сжигание на потоковой установке, предназначенной для изучения характеристик горения пылевидных топлив.

Эксперименты по совместному сжиганию тощего и газового угля с различными видами твердой биомассы показали улучшение условий воспламенения угля, с добавлением биомассы от 5 до 15 % по теплу. Показано влияние домешивания биомассы к углю на распределение температур по длине факела. В работе приведены зависимости степени конверсии газового угля и его смесей с измельченными пеллетами сосны, соломы пшеницы и шелухи подсолнечника, а также объяснена природа этой зависимости. По газовому анализу продуктов сгорания показано влияние добавления биомассы к газовому углю на образование оксидов азота.

Полученные выводы и зависимости обосновывают экологическую целесообразность и топливную эффективность совместного сжигания и позволяют перейти к разработке пилотного проекта частичного замещения угля на различные виды твердого биотоплива.

**Ключевые слова:** тепловые электростанции, пылеугольное сжигание, энергетический уголь, твердая биомасса, совместное сжигание.

## **1. Вступ**

Через військово-політичну ситуацію, що склалась в Україні останнім часом, виник гострий дефіцит антрациту та пісного вугілля. Для майже половини українських пиловугільних теплових електричних станцій (ТЕС) ці марки вугілля є проектним паливом.

Частково компенсувати зазначений дефіцит палива можна за рахунок спільного спалювання вугілля з твердою біомасою. На сьогоднішній день Україна має значний потенціал у виробленні біопалива, а саме деревних та агропелет. За даними Біоенергетичної асоціації України, щорічний потенціал біомаси в Україні оцінюється в 30 млн. т умовного палива (у. п.) – 23 %

споживання первинних енергоносіїв в країні, що дозволяє розглядати тверду біомасу в якості альтернативного палива.

Для оцінки оптимальних співвідношень вугілля та біомаси, враховуючи суттєві відмінності в елементному складі, структурі та реакційній здатності, необхідно дослідити процеси взаємного впливу двох твердих палив при спільному спалюванні.

Тому актуальним є дослідження особливостей спільного спалювання пісного та газового вугілля з різними найрозповсюдженими видами твердої біомаси.

## **2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит**

*Об'єкт дослідження* – процеси термічного перетворення енергетичного вугілля та біомаси, з метою створення ефективних та екологічно чистих технологій його спільного спалювання.

Спільне спалювання вугілля з біомасою можна організувати в щільному шарі, псевдорозрідженому шарі та за факельною технологією спалювання. В цій роботі розглядаються результати досліджень особливостей спільного спалювання біомаси з вугіллям саме при факельному способі через відсутність шарових котлів в великій енергетиці (окрім одного котла на Старобешівській ТЕС (м. Новий Світ, Україна), яка знаходиться на тимчасово окупованій території).

До 2013 р. антрацитові пиловугільні ТЕС України споживали близько 18 млн. т вугільної продукції на рік, а вже у 2015 р. надходження вітчизняного антрациту і пісного вугілля на ТЕС скоротилось до менше ніж 6,8 млн. т. Як наслідок, порівняно з 2013 р., виробництво електроенергії на ТЕС зменшилось на 44 %, що замало для регулювання графіку енергоспоживання і становить пряму загрозу енергетичній незалежності України. В останні роки відбувається поступове переведення антрацитових блоків на спалювання вугілля газової групи [1–3], що потребує значного обсягу часових та фінансових ресурсів. Переведення всіх антрацитових блоків вітчизняних ТЕС та теплоелектроцентралей (ТЕЦ) на спалювання газового вугілля може за певних умов призвести до його дефіциту. Цей фактор поряд з метою заміщення викопного палива відновлюваними джерелами і став причиною дослідження особливостей спільного спалювання з біомасою не тільки антрациту, а й газового вугілля.

Разом з проблемою пошуку альтернативних палив для антрацитових ТЕС в українській енергетиці існує необхідність нарощувати виробництво тепла та електроенергії на відновлюваних джерелах енергії. В рамках Європейського енергетичного співтовариства Україна зобов'язана скорочувати викиди шкідливих речовин і парникових газів від великих спалювальних установок. Оскільки біомаса є CO<sub>2</sub>-нейтральною і майже не має в своєму складі сірки та золи, вона є ідеальним паливом для отримання енергії без забруднення довкілля [4, 5].

## **3. Мета та задачі дослідження**

*Мета дослідження* – дослідити особливості спільного спалювання вугілля марок П (пісне) та Г (газове) з твердою біомасою у вигляді подрібнених пелет з метою визначення оптимального співвідношення двох видів палива.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Оцінити досвід спільного спалювання вугілля та біопалива у світі.
2. Визначити залежності зміни температури та положення ядра факела при спільному спалюванні вугілля з різними видами біомаси.
3. Отримати залежності повноти вигорання суміші різних видів біомаси з газовим вугіллям від співвідношення двох палив.
4. Оцінити зміни характеристик і викидів спалюючих установок при впровадженні спільного спалювання біомаси з вугіллям.

#### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Спільне спалювання на великих електростанціях є найбільш економічним варіантом використання енергетичного потенціалу біомаси для виробництва електроенергії та тепла, завдяки вищому, у порівнянні з котлами малої потужності, к.к.д. блоків. Окрім цього, технологія саме факельного спалювання біомаси та вугілля у потужних енергетичних парогенераторах дозволяє отримати найвищу ефективність, порівняно з іншими. На цей час біля 230 ТЕС та ТЕЦ потужністю від 50 до 700 МВт використовують спільне спалювання. Ця технологія популярна переважно в Азійських країнах (Японія, Китай), США та ЄС. Саме в ЄС на сьогоднішній день знаходяться в експлуатації понад 100 електростанцій, які використовують спільне спалювання. Станом на кінець 2019 року у Великобританії працює 19 крупних пилувугільних станцій, які використовували спільне спалювання вугілля з біомасою [6]. Уряд Великобританії прийняв напрямок розвитку енергетики, в якій не буде місця вугіллю, а деякі вугільні станції повністю переводяться на спалювання біомаси. Наприклад, якщо в балансі вироблення електроенергії у 2012 році вугілля складало близько 40 %, то у 2017 році його частка знизилася вже до 2 %.

Закордонний досвід довготривалого спільного спалювання біомаси з вугіллям довів, що ця технологія має безперечний позитивний оздоровчий вплив на навколишнє середовище. Біомаса майже не містить сірки та паливного азоту, тому її додавання до вугілля призводить до зниження викидів  $SO_2$  та  $NO_2$  на одиницю виробленої енергії. Спільне спалювання біомаси на електростанціях вирішує ще одну екологічну проблему – утилізації відходів сільськогосподарства та деревообробної промисловості [7, 8].

Поширення технологій спільного спалювання біомаси та вугілля створило ринок енергетичної біомаси та відповідну транспортну та заготівельну інфраструктуру, що дозволило створити значну кількість робочих місць. Через посилення вимог до викидів вугільних електростанцій в країнах ЄС більшість виробників електроенергії мають намір поширювати практику використання біопалива в великій енергетиці [9].

Поширенню практики спільного спалювання сприяла також відсутність потреби у великих капіталовкладеннях та можливість використання існуючої інфраструктури і обладнання електростанцій. Технологія спільного спалювання дозволяє швидко змінювати співвідношення біомаси та вугілля, що дає можливість електростанціям диверсифікувати паливозабезпечення [10].

Поряд із перевагами спільного спалювання існують чинники, які гальмують загальне розповсюдження цієї технології. Одним із недоліків є наявність у деяких видах біомаси калію, натрію та хлору, які можуть призвести до прискорення корозії поверхонь нагріву або їх шлакування [11, 12]. Іншим недоліком технології є не завжди стабільне постачання біопалива з необхідними характеристиками до електростанції через фактор сезонності, широкий діапазон властивостей біомаси одного виду і т. ін. [13].

Технологія спільного спалювання біомаси та вугілля поділяється на пряме, паралельне та непряме спалювання [14]. Під час прямого спалювання біомаса та вугілля подаються одночасно у паливню. При цьому можливі варіанти, коли біомаса змішується з вугіллем безпосередньо на паливному складі, спільно подрібнюються та одночасно подаються у комбіновані пальникові пристрої. Наявні модифікації цієї технології, за якими біомаса попередньо готується на окремих подрібнювальних пристроях та подається у комбіновані пальники (Studstrup, Данія, вугілля – солома), або біомаса подається у спеціально виділені пальники. У паралельному варіанті до наявного пиловугільного парогенератора приєднується виділений парогенератор для спалювання подрібненої біомаси у факелі. Непряме спалювання біомаси та вугілля передбачає попередню обробку біомаси у передтопках або у газифікаторах, а отриманий піролізний газ чи продукти газифікації спалюються спільно з вугіллем у топках існуючих парогенераторів.

Пряме спалювання є найпоширенішим способом спільного спалювання у світі та є найбільш прийнятним способом спільного спалювання для пиловугільних блоків українських ТЕС. Під час прямого спільного спалювання частинки обох твердих палив горять в одному об'ємі, що обумовлює їх взаємодію [15]. Тому для енергоефективного та екологічного впровадження цієї технології необхідно вивчити особливості спалювання сумішей твердого біопалива з вугіллем. В цій роботі представлені результати експериментального факельного спільного спалювання трьох видів біомаси з пісним та газовим вугіллем.

## **5. Методи дослідження**

Спільне спалювання вугілля та біомаси в умовах, наближених до умов в паливній котла проводилось в Інституті вугільних енерготехнологій Національної академії наук України на експериментальній установці ВГП-100В (Україна), яка дозволяє проводити спалювання двох твердих палив одночасно з витратою до 30 кг/год. Рівень температур може бути до 1700 °С, при цьому контролюються витрати компонентів, температури по довжині та склад газів на виході з установки.

Принципову схему пілотної установки ВГП-100В тепловою потужністю в режимі спалювання вугілля в незбагаченому повітрі до 100 кВт [16] представлено на рис. 1. Загальна довжина реактора 4,8 м, ділянки реактора до повороту в циклон 3,2 м; довжина діагностичної ділянки від вихідного перерізу пальникового пристрою 2,4 м.

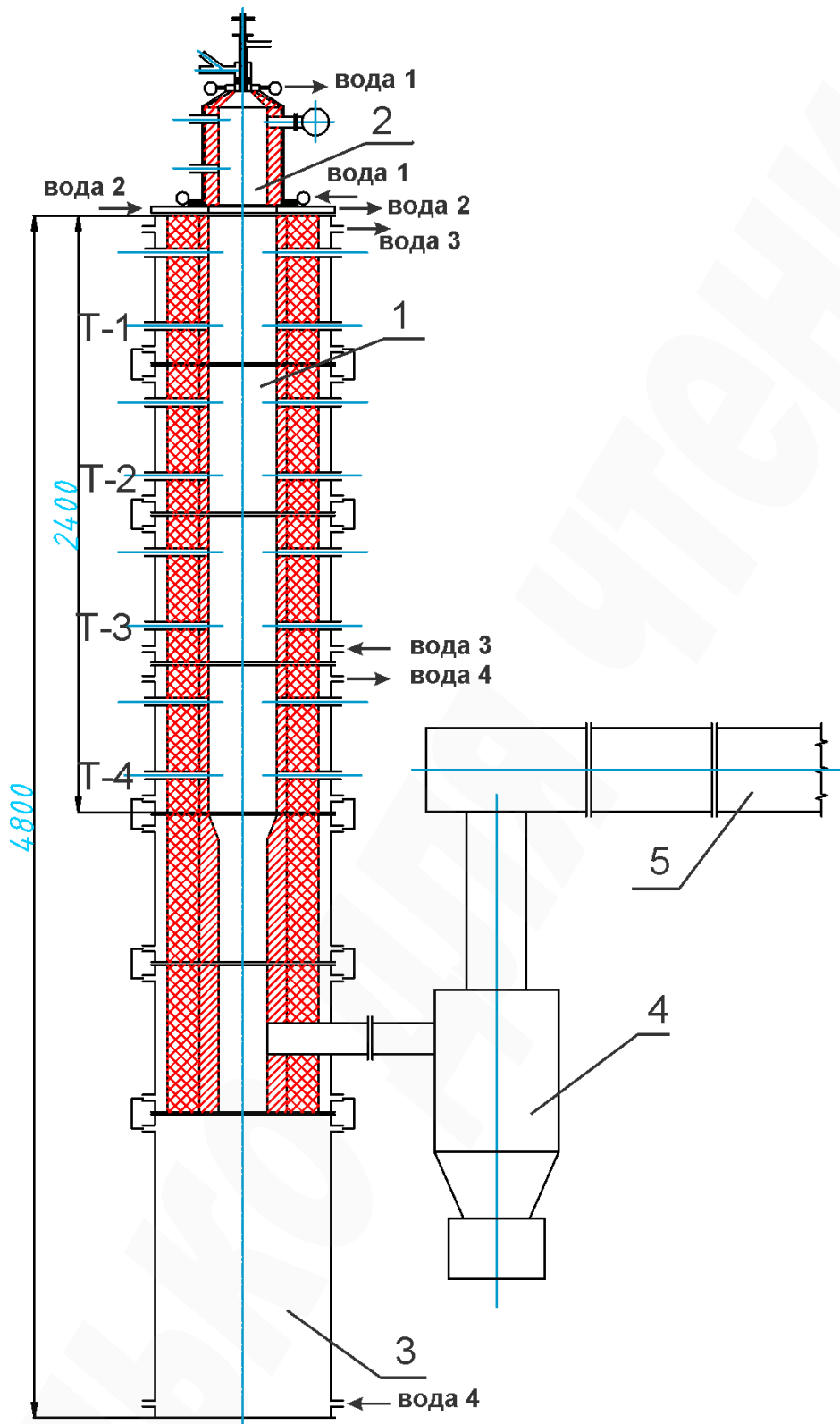
Діагностична ділянка складається з 4 секцій довжиною 0,6 м, внутрішній діаметр 0,28 м. Водоохолоджувані стінки реактора покриті зсередини

тришаровою футерівкою. У секціях передбачені експлуатаційно-діагностичні отвори, що використовуються для введення термопар, газовідбірних зондів та проведення пірометричних вимірювань.

Пальниковий пристрій являє собою вертикальний водоохолоджуваний футерований циліндр внутрішнім діаметром 0,2 м, довжиною 0,5 м, встановлений через водоохолоджуваний перехідний фланець на верхньому зрізі реактора, обладнаний двома пальниками і експлуатаційно-діагностичними вікнами. З його торця встановлений основний газовий пальник, призначений для спалювання природного газу. Окрім повітря та природного газу до нього подається від живильника вугільний пил. Коаксіально розташований канал природного газу, який закінчується короткою ділянкою з перфорацією для виходу газу. Коаксіально газовому розташований канал подачі повітря або суміші повітря і вугілля, який закінчується лопатевим завихрювачем для інтенсифікації перемішування повітря з газом, а вугілля – з продуктами згорання газу.

В установку передбачено подачу природного газу, повітря (в основний та допоміжний пальники, транспортуюче повітря з вугіллям та біомасою, вторинне повітря), біомаси та вугільного пилу.

В експериментах контролюються витрати природного газу, повітря, біомаси, вугільного пилу, температура футерівки по довжині, температура газового потоку, розрідження в реакційній зоні, склад продуктів згорання на виході з реактора.



**Рис. 1.** Експериментальна установка ВГП-100В:

- 1 – діагностична ділянка реактора; 2 – пальниковий пристрій;  
 3 – шлакозбірник; 4 – циклон; 5 – камера допалювання і охолодження

Газова фаза для аналізу відбирається постійно на виході з реактора водоохолоджуванним пробовідбірним зондом, оснащеним на виході фільтром – збірником твердої фази.

При температурі потоку 1200–1250 °С час перебування паливних частинок складав 0,75–0,8 с, що близько до часу перебування частинок в нижній радіаційній частині пилувугільних котлів. Попередні дослідження [17] свідчать, що за цей час перебування при спалюванні високозольного антрацитового пилу досягається ступінь конверсії вуглецю  $X_c=0,6-0,8$ , що також відповідає характеристикам пилувугільних котлів [18].

Дослідження спільного спалювання біомаси та вугілля були проведені у два етапи експериментів. На першому етапі спалювалось пісне вугілля з пелетами сосни, агропелетами та пелетами стебла соняшника, у другому – газового вугілля із пелетами сосни другої партії, соломи пшениці та лушпиння соняшника. Кожен етап складався із декількох експериментальних серій, протягом яких вугілля спалювалось із кожним видом біомаси у 2–3 співвідношеннях. Спочатку визначалися режимні параметри стабільного горіння вугільного пилу, а потім додавалася певна частка біомаси. Аналіз технічних характеристик досліджуваних палив наведений в табл. 1.



Таблиця 1

## Технічний та елементний аналіз досліджуваних палив

Найменування проби	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, $V^{daf}$ , %	Теплота згорання		Хлор на сухий стан палива, $Cl^d$ , %	Елементний склад, %				
					Вища, $Q_s^{daf}$ , МДж/кг	Нижча, $Q_i^r$ , МДж/кг		$C^{daf}$	$H^{daf}$	$O^{daf}$	$N^{daf}$	$S^{daf}$
Пелета сосни 1	8,7	0,4	0,03	85,9	20,921	17,632	0,04	51,87	6,33	41,63	0,14	0,03
Агропелета	8,4	6,1	0,14	82,0	19,629	15,573	0,27	50,30	6,21	42,81	0,53	0,15
Пелета стебла соняшника	9,3	9,7	0,18	80,3	19,647	14,814	0,42	49,35	6,20	43,35	0,89	0,21
Вугілля пісне	6,0	19,0	—	14,7	—	25,5	—	—	—	—	—	0,84
Пелета пшениці	9,0	12,4	0,12	84,2	19,667	14,410	0,39	49,6	6,55	41,56	2,15	0,14
Пелета сосни 2	6,8	0,8	—	86,1	21,092	18,077	0,10	52,93	6,64	37,67	2,76	—
Пелета лушпиння соняшника	10,7	5,8	0,24	80,7	21,786	16,972	0,53	53,77	6,38	38,10	1,49	0,26
Вугілля газове	1,3	23,5	2,44	43,1	35,388	21,47	0,61	86,99	5,00	5,31	1,44	1,26

Для спалювання обирався вугільний пил стандартного станційного помелу. Розсів подроблених пелет біомаси наведений в табл. 2.

**Таблиця 2**

**Розсів підготовленої до спалювання біомаси**

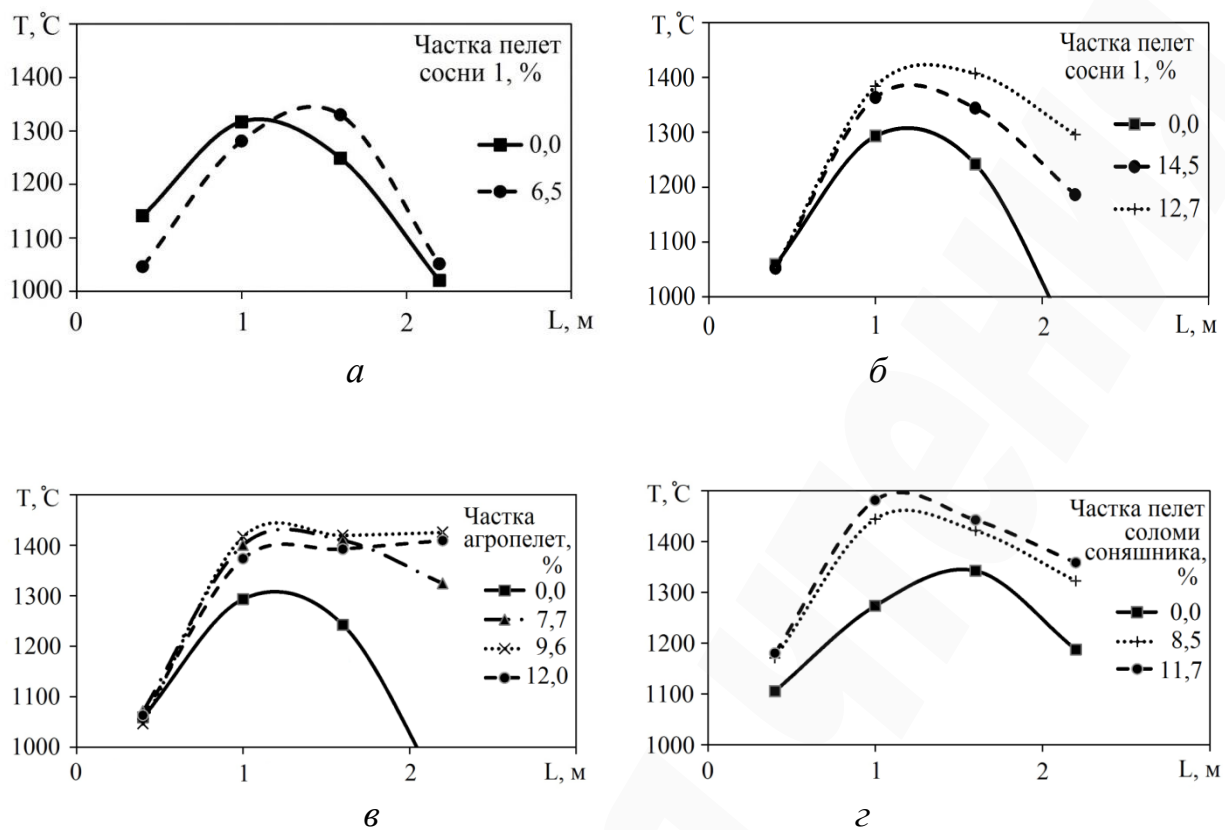
Фракція, мм	Пелета сосни 1, %	Агропелета, %	Пелета соломи соняшника, %	Пелета пшениці, %	Пелета сосни 2, %	Пелета лушпиння соняшника, %
>3	19,30	23,67	27,70	0,00	0,00	0,00
1,6–3	32,50	28,52	26,66	0,34	0,40	0,27
1–1,6	20,29	19,62	18,98	10,38	14,58	9,84
0,63–1	10,64	10,31	9,60	18,15	21,29	20,68
0,4–0,63	8,50	7,92	7,41	22,69	24,75	28,79
0,2–0,4	6,12	6,18	6,24	25,05	23,08	24,09
0,09–0,2	2,10	2,94	2,77	15,35	10,67	12,73
<0,09	0,54	0,83	0,66	8,02	5,22	3,59

Як видно з табл. 2, середній розмір біомаси суттєво не відрізнявся в кожному з етапів експериментів.

## **6. Результати дослідження**

На першому етапі спалювалось пісне вугілля з пелетами сосни першої партії, агропелетами та пелетами стебла соняшника у різних співвідношеннях (частка біомаси за теплом вказана у відсотках).

Основними показниками швидкості вигорання експериментальних режимів були температури потоку  $T$ , °С. Після спалювання пісного вугілля при подаванні біомаси в реактор температури в 2, 3 секціях майже завжди збільшувались на 100–200 °С, при тому що теплота згорання біомаси нижча. Це пояснюється більшою реакційною здатністю біомаси, що дозволяє скоротити факел і, відповідно, зменшити час вигорання палива. Профілі температур по довжині реактора в залежності від частки біомаси зображені на рис. 2. Для кожного виду біомаси профілі температур отримані у кожній серії експериментів.



**Рис. 2.** Температури в реакторі в режимах спільного спалювання пилу пісного вугілля та подрібнених пелет: *а* – сосни 1 першої серії; *б* – сосни 1 другої серії; *в* – агрокультур; *г* – стебла соняшника

При додаванні найменшої частки пелет сосни (6,5 %) до пісного вугілля було відзначено невелике збільшення температури біля 30 °С та зсув ядра факела на 0,5 м вниз – далі від пальникового пристрою (рис. 2, *а*). Із збільшенням частки пелет сосни до 12,7–14,5 % за теплом зростання температури факела склало 80–120 °С (рис. 2, *б*), ядро мало незначний зсув в сторону виходу установки.

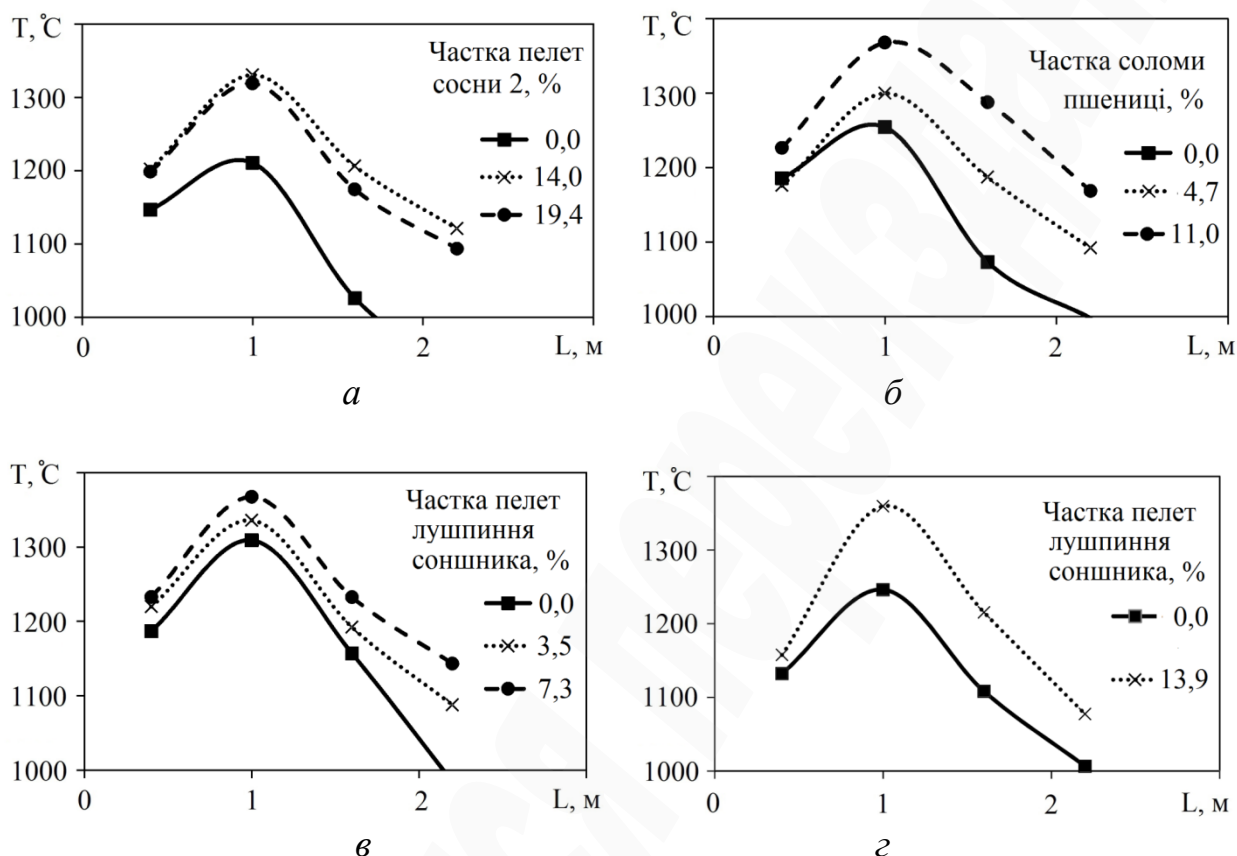
Дослідження спільного спалювання пилу пісного вугілля та агропелет показали менший вплив горіння біомаси (яка має нижчу теплоту згорання, ніж пелети сосни). Частка агропелет в третій серії експериментів варіювалась від 7,7 до 12,0 %. При цьому максимум росту температур (140 °С) було відзначено при витраті агропелет 9,6 % за теплом (рис. 2, *в*).

Спільне спалювання молотих пелет соломи соняшника з вугіллям забезпечило зростання температури ядра факела на 100–140 °С при даванні 8,5–11,7 % біомаси (рис. 2, *г*). При цьому ядро факела зсунулося ближче до пальникового пристрою, що вказує на інтенсифікацію процесу запалювання та горіння.

Експерименти першого етапу показали, що навіть при коливанні теплоти згорання біомаси від 14,8 до 17,6 МДж/кг коливання температури ядра факела виявилось незначним – 50–70 °С. При цьому максимум температур забезпечили агропелети з соломи, які мають не найвищу теплоту згорання.

На другому етапі спалювалось газове вугілля з пелетами сосни другої партії, соломи пшениці та лушпиння соняшника у різних співвідношеннях.

Термопари встановлювалися в тих самих місцях, як і на першому етапі. Газове вугілля містить більше 40 % летких речовин та має набагато більшу реакційну здатність у порівнянні з пісним вугіллям, що забезпечує його стабільне горіння без використання газу. Проте додавання біомаси, яка має меншу калорійність за газове вугілля, призводить до зростання температури в реакторі на 100–200 °С, що свідчить про інтенсифікацію займання навіть високореакційного вугілля. Профілі температур по довжині реактора в залежності від частки біомаси наведені на рис. 3.

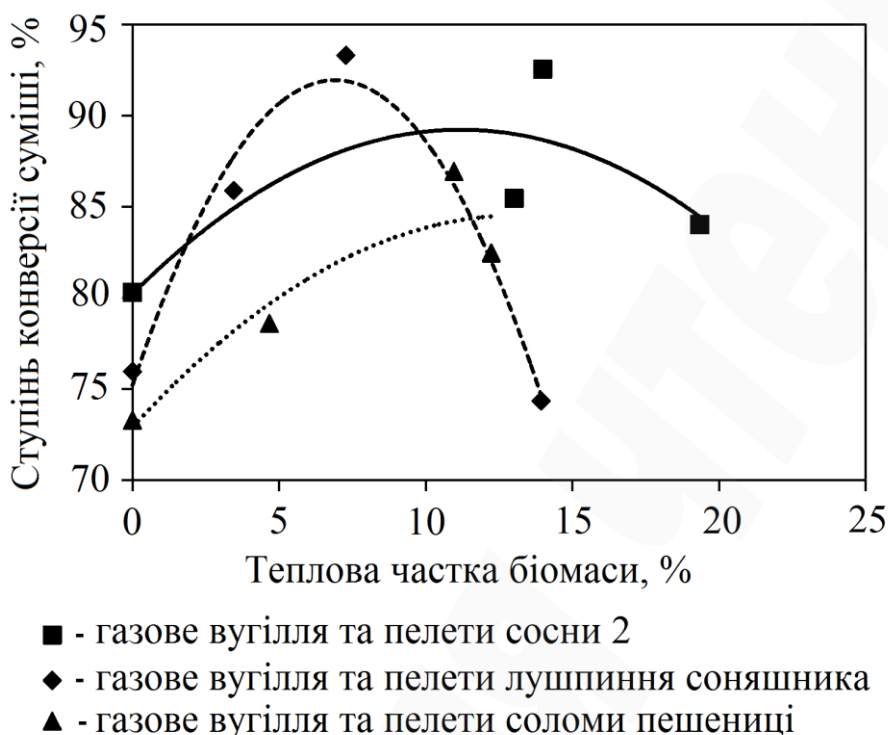


**Рис. 3.** Температури в реакторі в режимах спільного спалювання пилу газового вугілля та подрібнених пелет: *а* – сосни 2; *б* – соломи пшениці; *в* – лушпиння соншника третьої серії; *г* – лушпиння соншника четвертої серії

Після режиму на газовому вугіллі на вхід подавалося певна частка подрібнених пелет сосни другої партії, яка має найвищу теплоту згорання з досліджуваних зразків біомаси. Реакція установки на додавання біомаси була майже однаковою – мав місце підйом температур на 120 °С в 2-й секції і дещо більший підйом в інших секціях (рис. 3, *а*). Максимум температур спостерігається в діапазоні теплової частки біомаси від 7–8 % до 14–15 %.

У другому етапі досліджень, на відміну від першого, контролювалась ступінь вигорання палива загалом. Цей важливий показник процесу горіння необхідний для визначення оптимальної частки біомаси у суміші з вугіллям. Розділити окремо ступінь вигорання біомаси та вугілля виявилось неможливо, хоча при різній реакційній здатності швидкість вигорання вугілля і біомаси різні. Тому ступінь вигорання палива характеризував процес горіння в цілому. Для цього зондом на

виході установки відсмоктувалися продукти згоряння, з яких відфільтровувалися тверді частинки. За зольністю відібраної проби розраховувався середній ступінь конверсії для двох палив. Залежності ступеня конверсії сумішей від вмісту біомаси у суміші з газовим вугіллям показана на рис. 4.



**Рис. 4.** Ступінь конверсії суміші газового вугілля та різних типів біомаси в залежності від частки біомаси в суміші

Розрахунки ступеня конверсії демонструють покращення повноти вигорання суміші при додаванні найменшої частки біомаси (біля 5%). Із збільшенням частки біомаси у суміші вигорання покращувалось ще більше і досягало максимального значення в діапазоні 8–14%. Наявність екстремуму можна пояснити зміною балансу різнонаправлених ефектів. З одного боку додавання в невеликій кількості більш високореакційного палива, яке займається швидше ніж вугілля, покращує умови займання останнього. При цьому відбувається витрачання кисню на горіння додаткових летких речовин біомаси, яке відбувається біля кореня факела, що призводить до зменшення концентрації окисника у його ядрі. При додаванні лише 5% біомаси таке незначне зменшення не уповільнює вигорання вугільних частинок. Із збільшенням частки біомаси понад 8–14% ефект нестачі кисню починає переважати над позитивним ефектом раннього займання вугілля, що обумовлює зменшення ступеня конверсії суміші відносно максимального значення. Також на зниження позитивного ефекту при додаванні біомаси понад 8–14% впливає зменшення теплотворної здатності суміші. Через значно меншу калорійність біомаси подальше її додавання не призводить до зростання температури у ядрі факела (рис. 3).

Підвищення температури в ядрі має призвести до зростання викидів термічних оксидів азоту, а низький вміст азоту в біомасі має зменшити викиди паливних оксидів азоту при спільному спалюванні. Оцінювання результуючого впливу додавання біомаси на утворення NO проводилось за допомогою газового аналізу. Концентрація оксиду азоту на виході з установки в залежності від частки біомаси наведена на рис. 5.



**Рис. 5.** Концентрація оксиду азоту на виході в залежності від частки біомаси

Газовий аналіз показав, що при збільшенні частки біомаси для усіх трьох видів біомаси зміни середнього рівня концентрацій оксиду азоту не відбувалося. Отже, збільшення утворення термічних оксидів скомпенсоване зниженням термічних оксидів азоту. Це дозволяє зробити припущення, що в паливні котлоагрегату, де рівень температур при спільному спалюванні суттєво не відрізнятиметься від режимів спалювання вугілля, можна очікувати деякого зниження утворення оксидів азоту.

## 7. SWOT-аналіз результатів дослідження

*Strengths.* Спільне спалювання вугілля з біомасою дозволяє диверсифікувати паливозабезпечення українських вугільних ТЕС та ТЕЦ, знизити викиди пилу, оксидів сірки та азоту, зменшити плату за викиди діоксиду вуглецю, а також покращити повноту вигорання вугілля. Використання вітчизняного біопалива на великих електростанціях пришвидшить створення ринку біопалива в Україні та створить додаткове джерело для економічного зростання. Впровадження прямого спільного спалювання не вимагає великих капіталовкладень та дозволяє максимально використовувати існуюче обладнання.

*Weaknesses.* До недоліків спільного спалювання можна віднести відсутність в Україні єдиних стандартів якості біопалива, зокрема, біомаса не аналізується на вмісту хлору та калію, а також температуру плавкості золи. На сьогоднішній день відсутній ринок біомаси. Детально не пророблена логістична

система постачання біомаси на великі електростанції. Сезонність біомаси. На даний момент вартість виробленого тепла з біомаси вища за вугілля.

*Opportunities.* Впровадження спільного спалювання на вугільних електростанціях може зменшити витрати за викиди пилю, діоксиду вуглецю, оксидів сірки та азоту на 8–10 %. Перспективним для подальших досліджень є вивчення впливу золи біомаси на вихід летких речовин суміші, а також вивчення шлакувальних характеристик золи суміші. Можливість в подальшому повної заміни вугілля на котлі.

*Threats.* Для впровадження цієї технології необхідно розробити механізм розрахунку за вироблену електроенергію за «зеленим тарифом» у випадку спільного спалювання біомаси з вугіллям. На території електростанції необхідно буде організувати систему розвантаження, зберігання, транспортування, подрібнення та подавання біомаси до пальників. Системи зберігання біомаси необхідно обладнати системами контролю температур та пожежогасіння.

## 8. Висновки

1. Оцінивши світовий досвід спільного спалювання вугілля та біомаси на факельних котлоагрегатах, можна зробити висновок про те, що провадження цієї технології знижує викиди шкідливих речовин. А відповідно, і плату за них на 10–50 % в залежності від частки біомаси у суміші. Найефективнішим з точки зору мінімізації капітальних вкладень є пряме спільне спалювання. В Україні наявна широка ресурсна база біомаси (23 % споживання первинних енергоносіїв країни), яка дозволяє забезпечити роботу частини котлоагрегатів великих електростанцій.

2. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що додавання різних видів біомаси до пісного та газового вугілля призводить до зростання температури у ядрі факела на 100–200 °С. А також до стабілізації горіння факелу, його зсуву у бік пальникового пристрою, що в свою чергу свідчить про покращення умов займання вугілля.

3. Отримані залежності повноти вигорання суміші різних видів біомаси з газовим вугіллям від співвідношення двох палив демонструють покращення повноти вигорання суміші із збільшенням частки біомаси. Залежність має екстремум при додаванні 7–14 % біомаси за теплом.

4. Показано, що збільшення утворення термічних оксидів азоту в наслідок локального зростання температури компенсується зниженням виходу паливних оксидів азоту, що дозволяє припустити зниження загальної концентрації оксидів азоту у вихідних газах котлоагрегату.

## Література

1. Nechaieva, T. P. (2017). Assessment of the critical scenarios of coal supply for the Ukrainian power industry. *The Problems of General Energy*, 1 (48), 24–32. doi: <http://doi.org/10.15407/pge2017.01.024>
2. Cherniavskiy, M. V., Volchyn, I. A., Provalov, O. Yu., Miroshnychenko, Ye. S., Roskolupa, A. I., Moiseienko, O. V. (2018). Rozrobka tekhnolohichnykh rishen dlia



perevedennia antratsyovykh ta hazomazutnykh kotliv TETs na spaliuvannia hazovoho vuhillia. *Vuhilna teploenerhetyka: shliakhy rekonstruktsii ta rozvytku*. Kyiv, 189–194.

3. Cherniavskiy, M. V., Provalov, O. Yu. (2019). Naukovi osnovy ta tekhnichni rishennia dlia perevedennia Slovianskoi TES na hazove vuhillia. *Vuhilna teploenerhetyka: shliakhy rekonstruktsii ta rozvytku*. Kyiv, 106–110.

4. Verma, M., Loha, C., Sinha, A. N., Chatterjee, P. K. (2017). Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 732–741. doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.101>

5. *Statistics: CO2 Emissions from Fuel Combustion 2018 Highlights* (2018). International Energy Agency. Available at: <https://webstore.iea.org/co2-emissions-from-fuel-combustion-2018-highlights> (Last accessed: 08.10.2019)

6. *List of co-firing projects*. Available at: <https://demoplants21.bioenergy2020.eu/projects/displaymap/EGpJO2> (Last accessed: 10.10.2019)

7. Baxter, L. (2005). Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy. *Fuel*, 84 (10), 1295–1302. doi: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.09.023>

8. Demirbaş, A. (2003). Fuelwood Characteristics of Six Indigenous Wood Species from the Eastern Black Sea Region. *Energy Sources*, 25 (4), 309–316. doi: <http://doi.org/10.1080/00908310390142343>

9. Colechin, M., Malmgren, A. (2005). *Best Practice Brochure: Co-Firing of biomass (Main Report)*. Report No: Coal R 287 DTI/Pub URN 05/1160, 91.

10. Tillman, D. . (2000). Biomass cofiring: the technology, the experience, the combustion consequences. *Biomass and Bioenergy*, 19 (6), 365–384. doi: [http://doi.org/10.1016/s0961-9534\(00\)00049-0](http://doi.org/10.1016/s0961-9534(00)00049-0)

11. Macierska, A., Veringa, H., Sanders, I., Peteves S. D. (2006). *Co-firing of Biomass with coal: constrains and role of biomass pre-treatment*. DG IRC EU Institute of Energy, (EUR 22461 EN) (LD-NA-22461-EN-C), 113.

12. Kiel, J. H. A. (2008). *Biomass co-firing in high percentages opportunities in conventional and advanced coal-fired plants*. IEA TASK32, Workshop Geertruidenberg, ECN-L-08, 42. Available at: <https://publicaties.ecn.nl/PdfFetch.aspx?nr=ECN-L--08-080>

13. *Fossil Fuel Power Generation State-of-the art Report prepared by Power Clean R* (2004). D&D Thematic Network 30th July 2004, Contract No. ENK5-CT-2002-20625, 84.

14. Roni, M. S., Chowdhury, S., Mamun, S., Marufuzzaman, M., Lein, W., Johnson, S. (2017). Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1089–1101. doi: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.023>

15. Bescennii, I. V., Schudlo, T. S., Dunaevskaia, N. I., Topal, A. I. (2013). Issledovanie osobennosti goreniiia smesei koksov uglei razlichnoi stepeni metamorfizma i koksov biomassy. *Teploenergetika*, 12, 4–8. doi: <http://doi.org/10.1134/s0040363613120035>

16. Cherniavskii, N. V., Dunaevskaia, N. I. (1991). Dinamika konversii malometamorfizirovannykh uglei pri gazifikacii v potoke. *Problemy gazifikacii uglei*. Krasnoiarsk: KATEKNIENERGETIKI, 76–83.



17. Golyba, A. N., Zaruba, V. K., Kadochnikov V. N., Oks, T. A. (1995). Ob ustanovke vynosnykh kamer sgoraniia dlia nizkosortnogo uglia (kombastorov) firmy TRW (SSHA) pri rekonstrukcii bloka 200 MVt Zmievskei GRES. *Energetika i elektrifikaciia*, 3, 15–17.

18. Maistrenko, A. Iu., Cherniavskii, N. V., Iackevich, S. V. et. al. (1995). Ocenka uslovii stabilnogo goreniiia vysokozolnogo ASH v fakelnykh kotloagregatakh s zhidkim shlakoudaleniem. *Energetika i elektrifikaciia*, 1, 14–17.

*The object of research is the processes of thermal conversion of steam coal and biomass, with the aim of creating highly efficient environmentally friendly technologies for its joint combustion into fuel boiler units.*

*One of the important problems that impede the introduction of co-combustion of biomass with coal is the insufficient knowledge of the interaction of two very different solid fuels. The characteristics of grinding, particle aerodynamics, kinetics of all stages of combustion during the joint combustion of two solid fuels remain unexplored. Co-combustion of biomass with coal allows partially replacing scarce grades of steam coal, as well as reducing emissions of harmful gases and dust.*

*To study the peculiarities of co-combustion of coal and biomass, experimental and computational research methods are used, including combustion in a continuous installation designed to study the combustion characteristics of pulverized fuels.*

*Experiments on the combined combustion of lean and gaseous coal with various types of solid biomass showed an improvement in the ignition conditions of coal, with the addition of biomass from 5 to 15 % by heat. The effect of biomass impurities on coal on the temperature distribution along the length of the plume is shown. The paper presents the dependences of the conversion degree of bituminous coal and its blends with crushed pellets of pine, wheat straw and sunflower husk, and also explains the nature of this dependence. The gas analysis of the combustion products shows the effect of biomass blending in bituminous coals on the formation of nitrogen oxides.*

*The findings and dependencies justify the environmental feasibility and efficiency of co-combustion and allow to proceed to the development of a pilot project for partial replacement of coal with various types of solid biofuel.*

**Keywords:** *thermal power plants, coal-dust combustion, steam coal, solid biomass, co-combustion.*