
УДК 662.6

Н.І. Дунаєвська¹, канд. техн. наук, **Я.І. Засядько**², канд. техн. наук,

П.Я. Засядько², **Т.С. Щудло**¹

¹ Ін-т вугільних енерготехнологій НАН України
(Україна, 04070, Київ, вул. Андріївська, 19,
тел. (044) 4255068, e-mail: ceti@i.kiev.ua),

² Національний університет харчових технологій
(Україна, 01601, Київ-33, вул. Володимирська, 68,
тел. (044) 2895472, e-mail: info@nuft.edu.ua; iaroslav@nuft.edu.ua)

Математична модель процесів спільного спалювання біомаси з вугіллям в котлі теплової електростанції

У програмному пакеті Gambit створено геометричну модель робочої ділянки стенду для спалювання та газифікації пилоподібного вугілля. За допомогою побудованої моделі стенду високотемпературної газифікації в потоці продуктивністю до 100 кг вугілля на годину у вертикальному виконанні (ВГП-100В) в експериментальному режимі спалювання природного газу проведено розрахунок поправок до показників платина-платинородієвих (ПП) термопар. За програмою ANSYS CFX розроблено тривимірну модель процесів в пальнику котла ТПП-210А Трипільської ТЕС з термохімічною підготовкою низькорекційного вугілля, яка підтвердила ефективність конструкції. Наведено вихідні дані пальника тепловою потужністю 65 МВт для котла ТПП-210А при реалізації технології спільного спалювання біомаси з вугіллям на вітчизняних ТЕС.

Ключові слова: спільне спалювання, біомаса, вугілля, антрацит.

В программном пакете Gambit создана геометрическая модель рабочего участка стенда для сжигания и газификации пылевидного угля. С помощью построенной модели стенда высокотемпературной газификации в потоке производительностью до 100 кг угля в час в вертикальном исполнении (ВГП-100В) в экспериментальном режиме сгорания природного газа выполнены расчеты поправок показателей платина-платинородиевых (ПП) термопар. На основе программы ANSYS CFX разработана трехмерная модель процессов в горелке котла ТПП-210А Трипольской ТЭС с термохимической подготовкой низкорекреационного угля. Приведены исходные данные горелки мощностью 65 МВт для котла ТПП-210А при реализации технологии совместного сжигания биомассы и угля на ТЭС Украины.

Ключевые слова: совместное сжигание, биомасса, уголь, антрацит.

Технологія використання біомаси як додаткового палива при спалюванні вугілля почала розвиватися у дев'яностих роках минулого сторіччя. Зокрема, в Європі за такою технологією працює понад 200 котлоагрегатів, у яких використовується як додаткове паливо солома (ТЕС Студструп, Да-

© Н.І. Дунаєвська, Я.І. Засядько, П.Я. Засядько, Т.С. Щудло, 2017

нія), відходи деревообробного та паперового виробництва (ТЕС Кіміярві, Фінляндія), відсортовані тверді побутові відходи (так звані RDF — ТЕС Лахті, Фінляндія), подрібнені кісточки оливок та інших садових культур (ТЕС Пуертолано, Іспанія), пелети з різних відходів сільськогосподарського виробництва (ТЕС Драг, Великобританія, ТЕС Козенісе, Польща), та багато інших [1, 2]. Основними перевагами технології спільного спалювання біомаси та вугілля (ССБВ) над окремим спалюванням біомаси в спеціальних котлах є наступні:

- мінімальні витрати на капітальне будівництво, оскільки спалювання біомаси відбувається в уже існуючих котлах і потребує тільки створення окремої системи складування, транспортування та підготовки біомаси для спалювання;

- зменшення викидів забруднюючих речовин у довкілля, оскільки біомаса є CO_2 -нейтральним паливом, має значно нижчий (у порівнянні з вітчизняним вугіллям) вміст сірки та сполук азоту;

- зменшення виробітку тепла та електроенергії за рахунок викопного палива;

- утилізація відходів різних виробництв і тим самим зменшення забруднення навколишнього природного середовища;

- економічна доцільність використання біомаси у вугільних котлоагрегатах при наявності відповідного законодавства («зелений тариф», плата за скидання біомаси у відвали, тощо).

Таке спалювання може відбуватися за декількома технологіями [1]:

- у факельних котлоагрегатах;

- у котлах циркулюючого киплячого шару;

- газифікація біомаси в окремих газифікаторах з наступним спалюванням отриманого газу у вугільних котлах.

Щодо екологічних показників процесу спільного спалювання можна відзначити скорочення викидів оксидів сірки, що пояснюється меншим вмістом цієї речовини в біомасі та її CO_2 -нейтральність в процесах спалювання. Експериментальні дані по зменшенню оксидів азоту наведено в багатьох закордонних виданнях [3—5].

Скорочення NO_x можна пояснити технологічними чинниками, а саме:

- високий вміст летких речовин в біомасі створює збагачену паливом зону на початку полум'я на виході з пальника;

- високий вміст вологи в деяких біомасах впливає на скорочення викидів оксидів азоту в паливні котла.

В Україні на теперішній час відсутні не тільки промисловий досвід запровадження такої технології, але й достатній обсяг експериментальних досліджень щодо технології ССБВ для вітчизняних видів біомаси та вугілля.

ля українських покладів. Лише в декількох роботах описано динаміку процесів зневоднення біомаси та виходу летких речовин і запропоновано різні схеми організації процесу ССБВ [6, 7]. Особливо цікавою є технологія ССБВ при спалюванні такого різномірного палива як антрацит та рослинна тверда біомаса. Лише невелика за обсягом частка загальних світових досліджень технології ССБВ присвячена цим паливам, здебільшого це дослідження вчених з тих регіонів світу, де видобувається антрацит (3 % розвіданих світових покладів). Це — Корея, В'єтнам, Південна Африка, Іспанія та штат Пенсильванія у США.

Для України дотепер характерним є нерегулярне постачання вугілля антрацитової групи з окупованих територій Донецького вугільного басейну. Наприклад, в 2015 р. у порівнянні з 2013 р. постачання вугілля антрацитової групи (марки А та Т) на ТЕС скоротилося з 18 млн. т до 8 млн. т з урахуванням поставок з Росії та Південно-Африканської Республіки. В той же час, інтенсивно зростає ринок біомаси як палива (пелетні заводи, побудовані за гроші вітчизняних та іноземних грантів та інвесторів). Заміщення хоча б частини антрациту біомасою є одним із шляхів усунення критичної ситуації, яка взимку цього року призвела до відключення котлоагрегатів Зміївської та Трипільської ТЕС.

Інститут вугільних енерготехнологій (ІВЕ) майже 10 років працює над розробкою технології спільного спалювання біомаси та антрациту, започаткованої у 2007 р. спільним проектом з Піттсбурзьким центром вугільних енерготехнологій (РЕТС) Міністерства енергетики США в рамках програми НАТО «Наука заради миру». В ході проведення робіт було визначено оптимальні режимні характеристики, синергетичні ефекти взаємного впливу двох різномісних твердих палив, кінетичні характеристики тирси сосни для розрахунку процесу спалювання [8]. Метою досліджень було наступне:

визначити оптимальне співвідношення біомаса/антрацит для найбільш повного вигорання обох палив в заданий час перебування в паливні антрацитового факельного котлоагрегату;

визначити оптимальні режимні характеристики такого спалювання;

визначити кінетичні характеристики широкого спектру вітчизняної біомаси (тирси сосни, жому, пелет соломи пшениці, ріпака та ін.) для розрахунку процесу ССБВ;

дослідити вплив домішок біомаси на ефективність вигорання вугілля;

дослідити вплив домішок біомаси на екологічні показники вигорання суміші;

на основі експериментальних та теоретичних досліджень розробити конструкції пальників та передтопків для спалювання як окремо біомаси, так і її сумішей з вугіллям.

Передумовою впровадження технології ССБВ на будь-якому із котлів ТЕС чи ТЕЦ є розробка техніко-економічного обґрунтування (ТЕО). Оскільки проведення експериментів на реальних установках пов'язане із значними матеріальними та часовими затратами, що значно обмежує можливість кількості дослідів, постало завдання розробки математичної моделі процесів ССБВ з метою створення ТЕО для впровадження технології ССБВ на котлі ТПП-210А Трипільської ТЕС.

Побудова обчислювальної гідродинамічної (CFD) моделі експериментального стенду ВГП-100В. Створення математичної моделі стенду ВГП-100В базовано на необхідності визначення коректних граничних умов для режимів сумісного спалювання декількох палив, таких як газ та вугілля, газ, вугілля та біомаса і вугілля та біомаса, та необхідності зведення теплового балансу установки.

При розробці моделі враховано наступне:

1. Модель дозволить на основі порівняння даних реального калориметрування (вимірювання тепловитрат від секцій реактора) визначити реальні теплові потоки на секціях і, співставляючи їх з розрахунковими значеннями, визначити величини еквівалентних коефіцієнтів тепловіддачі, які б забезпечили відповідність розрахункових тепловитрат реальним.

2. Проведення експериментів на установці ВГП-100В пов'язане із значними матеріальними та часовими затратами, що значно обмежує кількість дослідів.

3. Експериментальні дані слід доповнити, отримавши неперервні функції розподілу температури по довжині, по перерізу реактора, визначити розподіл швидкостей, хімічний склад продуктів згоряння у кожній точці діагностичної ділянки, отримати додаткові дані, інтерполювавши наявні дані проміжних режимів, які не були включені до експерименту.

Маючи адекватну математичну модель, можна провести додаткові дослідів із варіюванням частки газу, біомаси та вугілля, уточнити та доповнити отримані раніше дані. Першим кроком у створенні математичної моделі є створення геометричної моделі, що відображає будову робочої ділянки ВГП-100В. Побудова геометричної моделі відбувалась у програмному пакеті Gambit. На основі побудованих раніше моделей було змодельовано тільки внутрішню частину ВГП-100В без створення спряженої задачі теплообміну у обмурівці, тепловій ізоляції та каналах з охолоджуючою водою у стінках, оскільки такі умови значно ускладнюють розрахунок, кардинально збільшують машинний час, необхідний для обрахунку задачі із великою сходиністю. Було створено модель включно із ділянкою шлакозбірника та частиною ділянки вихідного газоходу задля отримання коректного поля швидкостей на діагностичній ділянці та прийняте деяке спрощення геометрії пальників для уникнення ускладнення моделі.

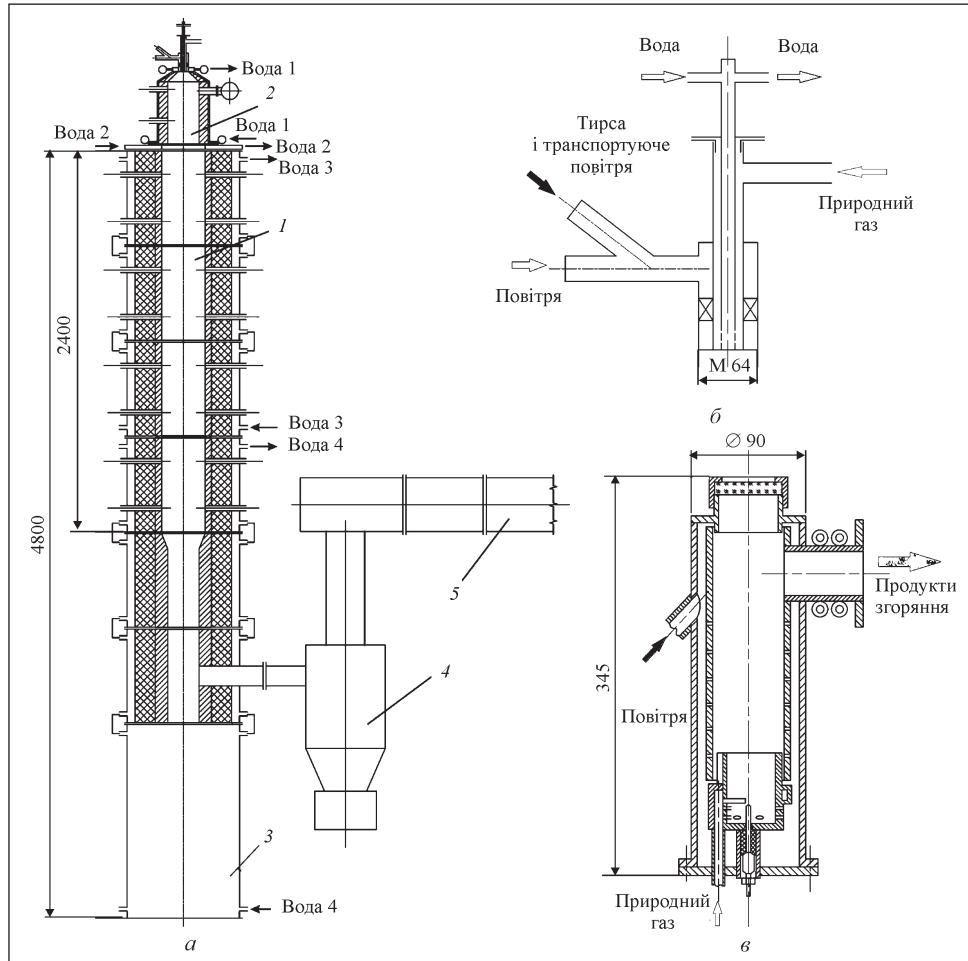


Рис. 1. Схема геометричної моделі стенду ВГП-100В: *a* — експериментальний стенд ВГП-100В; *б* — основний паливник; *в* — допоміжний паливник; *1* — діагностична ділянка реактора; *2* — паливниковий пристрій; *3* — шлакозбірник; *4* — циклон; *5* — камера охолодження

Принципова схема установки ВГП-100В тепловою потужністю в режимі спалювання вугілля в незбагаченому повітрі до 100 кВт представлена на рис. 1. Установка включає вертикальний реактор із нисхідним потоком загальною довжиною реактора 4,8 м. Ділянка реактора до повороту в циклон — 3,2 м, довжина діагностичної ділянки від вихідного перерізу паливникової пристрою — 2,4 м. Діагностична ділянка складається з чотирьох секцій довжиною по 0,6 м кожна, внутрішній діаметр 0,28 м (діаметр іншого каналу до повороту 0,2 м). Детальний опис установки наведено в [8].

Геометрична модель експериментальної ділянки ВГП-100В створюється у чотири етапи.

1. Будуємо об'ємну модель з тривимірних простіших елементів (до складу побудованої моделі, наприклад, входять циліндричні елементи, зрізані конуси). Із внесеними тривимірними елементами виконуємо операції взаємного перенесення, спряження, додавання та віднімання для створення досліджуваного об'єму.

2. Виконуємо операції зшивання поверхонь, об'єднання нескріплених об'ємів в один.

3. Задаємо граничні умови на поверхнях, позначаємо умовно-адіабатні стінки, стінки, на яких відбувається теплообмін, зони входу до об'єму палива, зони виходу продуктів згоряння з об'єму.

4. Проводимо розбивку поверхонь на сітку з наступною розбивкою об'єму на розрахункову сітку (можливі різні види розбивки, різні параметри сітки та параметри спряження поверхневих та об'ємних сіток).

При створенні декількох перших геометричних моделей виникла проблема балансу між величиною комірки сітки та найменшими геометричними розмірами моделі, тобто розміри комірки розбивки були більшими за геометричний розмір, що розбивається. Створення декількох сіток з різними параметрами, та порівняння їх дієздатності дозволило обрати сітку із змінним кроком комірок, у якій було використано прийом збільшення кроку від мінімального, на найменшій геометричній поверхні, до кроку, заданого для розбивки основного об'єму. Таке рішення дало можливість значно збільшити точність розрахунків на малих геометричних поверхнях без небажаного ускладнення моделі та непотрібного збільшення числа розрахункових вузлів.

Враховуючи особливості течії при переході з зони основного пальника у діагностичну секцію, яка має розширення, нерівномірне розбиття сітки використовувалося і на повздовжній частині реактора. Так, саме в місці розширення діагностичної секції крок сітки становив 5 мм з наступним переходом на 30 мм. Відповідним чином сітка з перемінним кроком відображалася усередині об'єму для більш точного розрахунку параметрів потоку у пристінній області, в місцях зміни характеристик течії. Зовнішня частина розробленої сітки показана на рис. 2, а (див. вклійку).

Для детальнішого моделювання процесу теплообміну та перевірки отриманих результатів після попередніх етапів моделювання було розроблено сітку стенда ВГП-100В з моделями термопар, розташованих приблизно на осі потоку на чотирьох діагностичних секціях. Для моделювання теплообміну в районі термопар було згенеровано сітку з розміром комірки 1 мм (див. рис. 2, б).

Для розбиття основного об'єму створеної геометричної моделі на сітку використовувалися тетраедри або гібридні комірки з кроком 30 мм. Стінки основного об'єму розбивалися на відповідні до тетраедрів основного об'єму трикутні елементи. Стінки малих геометричних поверхонь розбивалися на трикутні комірки з кроком 3 мм. Об'єм малих геометричних елементів розбивався на відповідні до трикутників тетраедри з поступовим збільшенням до розмірів тетраедрів основного об'єму. Файл зі згенерованою таким чином у пакеті Gambit сіткою імпортовано до програми Fluent програмного комплексу ANSYS.

Розрахунок поправок до показників ПП термопар за побудованою моделлю на основі експериментального режиму спалювання природного газу на стенді ВГП-100В. Показники температури усередині реактора знімалися трьома засобами:

1) температура футеровки фіксувалась термопарами хромель-алюмель, вмонтованими у футерівку на 5—10 мм від вогневого слою;

2) пірометром ДПР-1, що дозволяв знімати температуру вогневого шару через діагностичні отвори з деякою періодичністю;

3) температура газового потоку по вісі реактора знімалася ПП термопарами (з діаметром дроту 0,2 мм), вмонтованими у корундові захисні чохла з діаметром каналів під термопару 0,5 мм, та встановленими у діагностичні отвори реактора.

Гарячі спаї термопар покривалися плівкою з корунду, холодні спаї термопар не заохолоджувалися; відхилення показань термопар на 20°C і температура повітря у боксі враховувалися при проведенні розрахунків.

При порівнянні експериментальних даних та даних, отриманих методом розрахунку математичної моделі, виявилось, що температура газів, виміряна по осі діагностичного реактора в експерименті, та температура по осі реактора, отримана в результаті розрахунку, значно різняться, але мають спільну тенденцію. Розрахункова температура перевищує температуру, отриману експериментально, на 150—180°C. Цю різницю можна пояснити фактом перевипромінювання гарячого спаю термопар на охолоджену поверхню стінки реактора. Було створено приблизний тепловий баланс для королька термопар, щоб визначити величину похибки вимірювання температури газового потоку по осі реактора термопарою.

Слід зазначити, що розрахункова модель дещо ускладнювалася фактом променевого теплообміну між термопарою та газовим потоком, оскільки, як відомо, гази мають властивість поглинати та випромінювати енергію. Поглинання та випромінювання одно- та двоатомних газів, зокрема азоту, кисню, водню, гелію настільки незначні, що ними в інженерних розрахунках здебільшого нехтують. Для теплотехнічних розрахунків

найбільший інтерес викликають водяна пара та діоксид вуглецю. Саме ці гази входять до складу продуктів згоряння різних видів палив. Спектри випромінювання та відповідно поглинання газів, на відміну від більшості твердих тіл, мають селективний характер, тобто процеси поглинання та випромінювання відбуваються лише усередині ряду дискретних смуг спектру. При інших довжинах хвиль газ веде себе як прозоре середовище [9].

Припустимо, що газ має постійну температуру T_g , а стінка — постійну температуру T_c і обидва вони є сірими тілами. Випромінювання стінки має неперервний спектр. Газове середовище має селективно-сіре випромінювання у вигляді окремих смуг e_1, g_1, e_2, g_2 . У загальному випадку число таких смуг може бути різним. Газове середовище обмінюється променевими потоками із стінкою тільки в межах цих смуг. За спектральними смугами окремі елементи стінки обмінюються променевими потоками тільки між собою. Для ізотермічної стінки результуючий потік цього теплообміну дорівнюватиме нулю. Тоді променевий потік від газу до стінки можна виразити залежністю

$$Q_{g,c} = (E_{\text{эф.г}} - E_{\text{эф.с}}) F_c, \quad (1)$$

де F_c — площа поверхні стінки; $E_{\text{эф.г}}$ і $E_{\text{эф.с}}$ — щільність теплового потоку ефективного випромінювання газового середовища і ефективного випромінювання стінки.

Щільності теплових потоків ефективного випромінювання газового середовища та стінки знайдемо за методом сальдо. Вони можуть бути представлені залежностями, що справедливі для окремих смуг випромінювання:

$$E_{\text{эф.г}} = (E_{0g})_{\Delta\lambda} + q_{g,c} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{g\Delta\lambda}} \right), \quad E_{\text{эф.с}} = (E_{0c})_{\Delta\lambda} + q_{c,g} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{c\Delta\lambda}} \right). \quad (2)$$

Чорне випромінювання газу та стінки, що відповідає граничним значенням їх ступенів чорноти, можна представити у вигляді:

$$(E_{0g}) = C_0 \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 \varepsilon_g^\infty, \quad (E_{0c}) = C_0 \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \varepsilon_c^\infty, \quad (3)$$

де ε_g^∞ та ε_c^∞ — граничні ступені чорноти газу, що визначаються з номограм відповідно за температурою газу та стінки ($\varepsilon^\infty = f(T)$). Ступінь чорноти газу $\varepsilon_{g\Delta\lambda}$ визначається за наступною залежністю:

$$\varepsilon_{g\Delta\lambda} = \frac{k_1 l_1 e_1 g_1 + k_2 l_2 e_2 g_2}{a_1 b_1 e_1 g_1 + a_2 b_2 e_2 g_2} = \frac{E_{g\Delta\lambda}}{(E_{0g})_{\Delta\lambda}} = \frac{\varepsilon_g E_{0g}}{\varepsilon_g^\infty E_{0g}} = \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_g^\infty}. \quad (4)$$

Ступінь чорноти стінки в межах окремих смуг $\Delta\lambda$ може дорівнювати інтегральній ступені чорноти $\varepsilon_{c\Delta\lambda} = \varepsilon_c$. Для стаціонарного теплового режиму $q_{г,с} = -q_{с,г}$. Тоді з урахуванням залежностей (1)–(4) отримаємо наступний розрахунковий вираз для променевого потоку $Q_{г,с}$ (Вт), що передається від газового середовища до стінки:

$$Q_{г,с} = \frac{C_0 F_c \left[\varepsilon_{г}^{\infty} \left(\frac{T_{г}}{100} \right)^4 - \varepsilon_{г,с}^{\infty} \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right]}{\frac{\varepsilon_{г}^{\infty}}{\varepsilon_{г}} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1}$$

Як показано вище, у загальному випадку інтегральні значення ступеню чорноти для суміші газів не дорівнюють сумі їх значень для окремих компонентів суміші. Так, для суміші CO_2 та H_2O ступінь чорноти газу та коефіцієнт поглинання менший за суму їх значень для CO_2 та H_2O , що пояснюється частковим співпадінням її спектрів випромінювання: $\varepsilon_{г} = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{CO}_2} - \Delta\varepsilon_{г}$.

Ступені чорноти пари та двоокису вуглецю беремо з графіків температури газу при відповідних добутках парціального тиску на довжину шляху променя (pl). Наближено середня довжина шляху променя визначається так: $l = m \frac{4V}{F_c}$, де V — об'єм газового тіла; $m = 0,9$ — поправочний

коефіцієнт. Поправка на відхилення від закону адитивності для газових сумішей за рахунок взаємного поглинання випромінювання компонентами також беремо з графіків.

Наведена методика розрахунку коректна тільки для газових середовищ, які не містять підвішених твердих частинок продуктів згорання. Розрахунок похибки, внесеної перевипромінюванням, при вимірюванні величини температур продуктів згорання на осі реактора проведено у програмі Mathcad. Мета розрахунку — визначити температуру гарячого спаю термопари, внесеної в потік продуктів згорання природного газу із відомою швидкістю потоку та температурою по осі каналу, враховуючи вплив перевипромінювання з поверхні королька термопари на більш холодні стінки реактора, ґрунтуючись на даних, отриманих з математичного розрахунку моделі.

Розрахунок проводився за умови рівності кількості тепла, підведеного до королька термопари, та кількості тепла, відданого стінці термопарою при перевипромінюванні. Підведення тепла відбувалося за допомогою конвективного теплообміну, власного випромінювання нагрітих димових газів та випромінювання нагрітої футерівки пальникової головки. Для приблизного оцінювання впливу величини перевипромінювання застосо-

вано спрощену модель променевого теплообміну між поверхнею королька та нагрітою поверхнею футерівки, де поверхня королька та випромінююча поверхня футерівки — плоско-паралельні, площа поверхні королька, що сприймає випромінювання, дорівнює половині загальної площі королька термопар, приведена поглинаюча спроможність $\varepsilon_{\text{п}}$ дорівнює 0,9, а температура нагрітої футерівки дорівнює температурі газового ядра $T_{\text{г}}$:

$$Q = \alpha (T_{\text{г}} - T_{\text{т}}) F_{\text{к}} + \frac{F_{\text{к}} \varepsilon_{\text{п}} \left(\left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{т}}}{100} \right)^4 \right)}{2} + \frac{C_0 F_{\text{к}} \left[\varepsilon_{\text{г}}^{\infty} \left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \varepsilon_{\text{г,с}}^{\infty} \left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 \right]}{\frac{\varepsilon_{\text{г}}^{\infty}}{\varepsilon_{\text{г}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{с}}} - 1},$$

$$Q = \varepsilon C_0 F_{\text{к}} \left(\left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right),$$

де $T_{\text{т}}$ і $T_{\text{с}}$ — температура термопар і температура стінки в абсолютних одиницях, К; $T_{\text{г}}$ — фактична температура газу в абсолютних одиницях, К; α — коефіцієнт тепловіддачі між поверхнею королька термопар та газовим середовищем, Вт/(м²· К); ε — ступінь чорноти корунду, що вкриває поверхню королька; $F_{\text{к}}$ — площа поверхні королька, м².

Коефіцієнт тепловіддачі розраховано для випадку зовнішнього обтікання нагрітими димовими газами, внесеними у потік шару королька термопар. Теплофізичні параметри розраховано програмою EneCalc3 згідно з формулою, наведеною в [9]: $Nu = 2 + 0,03 Re^{0,54} Pr^{0,33} + 0,35 Re^{0,58} Pr^{0,36}$. Швидкість розрахунку числа Рейнольдса отримано на створеній математичній моделі та прийнято постійною: $w = 4,5$ м/с. Діаметр королька термопар прийнято $d = 0,005$ м. Коефіцієнт тепловіддачі α розраховано при трьох різних температурах набігаючого потоку — ядра димових газів.

Розрахунки проведено для температур газового ядра (рис. 3). У підсумку отримано трансцендентне рівняння четвертого ступеню з нелінійними коефіцієнтами, розв'язок якого знайдено як точка перетину двох зазначених функцій у програмному пакеті Mathcad.

З огляду на рис. 4 (див. вклійку), можна очікувати, що при фактичній температурі потоку 2200 К та температурі стінки 2000 К термопарі пока-

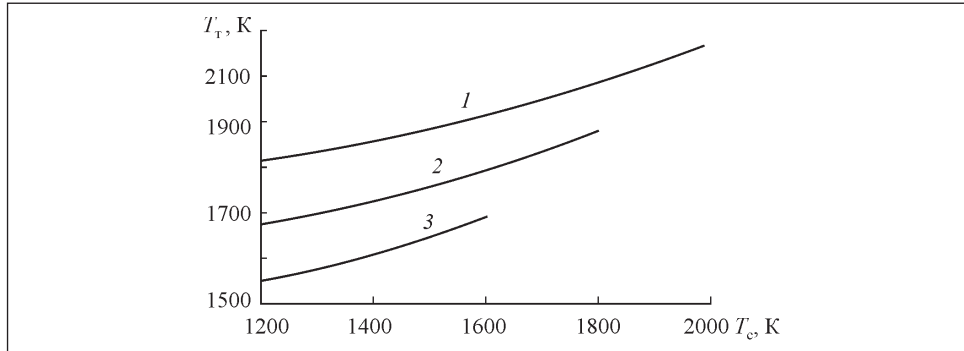


Рис. 3. Залежність розрахованих значень показників термопар, встановленої у потоці випромінюваних димових газів, від температури стінки каналу при різних температурах потоку: 1 — $T_r = 2200 K$; 2 — $T_r = 2000 K$; 3 — $T_r = 1800 K$

жуть температуру на 123 K менше за фактичну. Різниця між фактичною температурою та показаннями термопар зростає до 386 K при температурі стінки 1200 K. Очевидно, що при температурі ядра 1800 K та температурі стінки 1600 K похибка показів термопар становитиме 114 K, що є меншим за похибку при вимірюванні більшої температури ядра.

Аналізуючи отримані дані, приходимо до висновку, що перевипромінювання відіграє значну роль у вимірюванні температури. Наступним кроком у розробці моделі є уточнення моделей опромінювання поверхні королька термопар від гарячої частини футеровки.

Моделювання процесів в пальнику котла ТПП-210А Трипільської ТЕС в тривимірному наближенні. Моделювання пальника котла ТПП-210А Трипільської ТЕС проведено з використанням методик, що застосовувались при створенні моделі стенду ВГП-100В. Було використано найбільш універсальну тетрадральну сітку (див. рис. 4). Технологія термохімічної підготовки вугільного пилу (ТХП), яку було випробувано на Трипільській ТЕС у 2010 р., полягає у попередньому прогріванні частини потоку вугілля в спеціальному муфелі, розташованому в центральному каналі пальника, внаслідок спалювання невеликої кількості природного газу.

Моделювання процесу спалювання вітчизняного антрациту потребує значної кількості розрахункових вузлів у розробленій сітці, що вимагає значних витрат машинного часу. Тому попередні налагоджувальні розрахунки проводились на дещо спрощеній моделі. Так, замість даних реального ситового аналізу вугілля з розподілом по фракціях за Розіном—Рамлером було розглянуто лише одну фракцію 25 мкм, що суттєво спростило розрахункову процедуру. У розрахунках використано наступні зна-

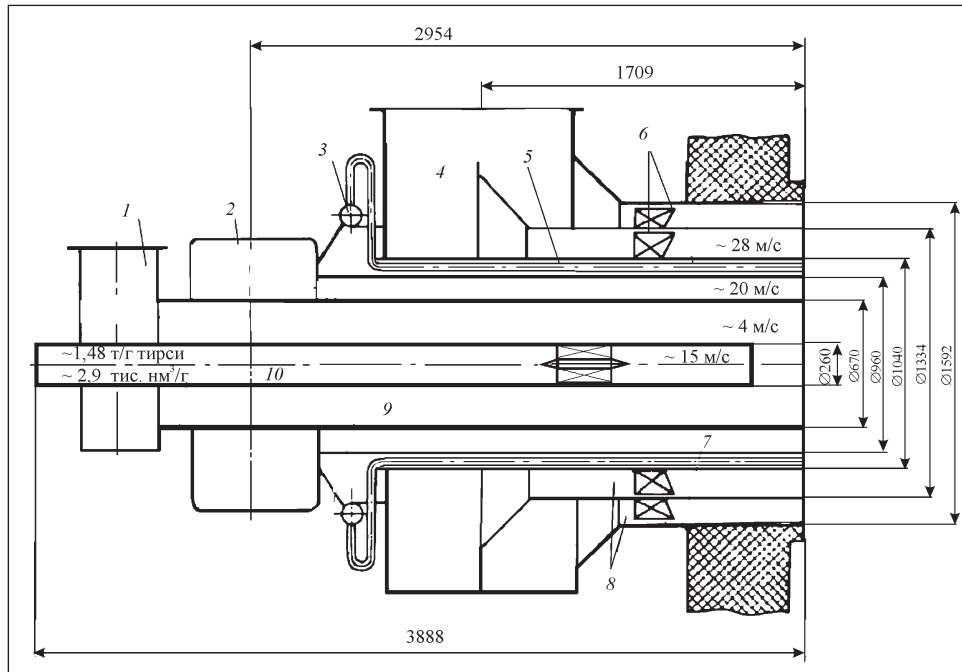


Рис. 7. Схема пальника котлоагрегату ТПП-210А після впровадження спільного спалювання: 1 і 2 — равилки центрального повітря (приблизно 3—4 тис. $\text{м}^3/\text{г}$ повітря) і пиловугільної суміші (приблизно 9,5 т/г вугілля); 3, 5 — існуючі газові магістралі; 4 і 6 — підводи (приблизно 52 тис. $\text{м}^3/\text{г}$ повітря) і завихрювачі вторинного повітря; 7 — канал первинної аеросуміші; 8 — канали вторинного повітря; 9 — муфель; 10 — канал подавання біомаси

чення режимних параметрів: масова витрата вугілля на ТХП — 0,8 кг/с; основного потоку вугілля — 2,2 кг/с; повітря на вході ТХП — 10 м/с; повітря на основний потік — 16 м/с; температура потоків 300 К.

На рис. 5 (див. вклійку) відображено аеродинаміку пальника при протіканні процесу ТХП, а саме зображено поперечні перерізи з розміщеними на них векторами швидкості. Помітно, що зона низьких швидкостей локалізується приблизно по осі каналу.

На рис. 6 (див. вклійку) показано треки часток з температурами, позначеними кольорами на відповідних треках. За результатами аналізу розподілу летких у пальнику можна зробити висновок про те, що внаслідок утворення умов ТХП у муфелі та подачі природного газу для ініціювання процесу ТХП вугілля усередині муфеля інтенсивно розігрівається (внутрішні треки, що проходять через внутрішній лопатковий апарат). При цьо-

му спостерігається вихід летких (див. рис. 5, зона муфеля), зона виходу яких співпадає із зоною високої температури.

Таким чином, на основі програми ANSYS CFX розроблено тривимірну модель процесів в пальнику котла ТПП-210А Трипільської ТЕС з термохімічною підготовкою низькорекційного вугілля, яка підтвердила ефективність конструкції.

Розробка вихідних даних для ТЕО впровадження ССБВ. На підставі отриманих результатів експериментальних досліджень та наведених CFD розрахунків створено проект пальника тепловою потужністю 65 МВт для котла ТПП-210А з метою реалізації технології ССБВ. У якості біомаси обрано відходи деревообробної промисловості — тирсу сосни. Для цієї біомаси у попередніх експериментах було визначено оптимальне (з огляду на вигорання вуглецю вугілля) співвідношення за теплом 1:10.

У проекті враховано необхідність транспортування біомаси до пальника холодним повітрям (для запобігання передчасному займанню), а звідти подавання біомаси окремим потоком безпосередньо в пальник, оскільки первинна аеросуміш антрацитового пилу та повітря мають температуру близько 240 °С. Тирсу подавали в реконструйовану центральну трубу пальника, у якій раніше розміщували мазутну форсунку для розпалювання котла.

Потік деревинної біомаси потрібно закручувати з метою забезпечення гарного перемішування гарячих продуктів згоряння летких речовин тирси з вугільним пилом. Необхідний параметр кручення становить $n = 2$. У коаксіальний канал, утворений в процесі модернізації пальника для ССБВ, доцільно подавати повітря з витратою не менше 3000 м³/г. Регулювання загальної витрати повітря на пальниковий пристрій залишається без змін і забезпечується регулюванням витрат вторинного повітря.

На рис. 7 наведено схему запропонованого пальника, який має наступні технічні характеристики:

загальна довжина, м	3,8
діаметр каналу	
аеротранспорту біомаси, м	0,26
центрального повітря, м	0,67
аеросуміші з первинним повітрям	0,96
діаметр	
першого каналу вторинного повітря, м	1,3
другого каналу вторинного повітря, м	1,5
проектні витрати повітря, м ³ /г:	
пневмотранспорт біомаси	2 964
центрального	2 500

первинного	11 500
вторинного	43 200
усього	60 164
температура перед входом у пальник, °С:	
повітря	340—360
повітря, що транспортує біомасу	температура
	навколишнього середовища
первинної аеросуміші	250
розрахункові витрати вугілля за номінального навантаження, т/г	8,17
технічний аналіз:	
вугілля антрацит	$A^d = 22,4 \%$, $W_i^r = 10 \%$, $Q_i^r = 22,7$ МДж/кг
вугільного пилу	$W_i^r = 1 \%$, $Q_i^r = 25,2$ МДж/кг
біомаси	$V^{daf} = 85 \%$, $A^d = 1,75 \%$, $W_i^r = 10 \%$, $Q_i^r \sim 15$ МДж/кг
потужність, МВт	65

Висновки

Використання для моделювання експериментального стенду розрахункової сітки зі змінним розміром комірки дозволило розмістити достатню для розрахунку кількість комірок як у елементах з малими, так і великими геометричними розмірами при оптимальній, з точки зору використання машинного часу, загальній кількості комірок.

Розрахунок поправок до показників ПП термопар показав суттєвий вплив перевипромінювання з королька термопар на вимірювання температури. Величина поправки може сягати кількох сотень градусів в залежності від величини різниці між температурою стінки та газів в реакторі.

Розроблена тривимірна модель процесів в пальнику котла ТПП-210А Трипільської ТЕС з термохімічною підготовкою вугілля забезпечила необхідну аеродинаміку потоків реагентів.

Отримані вихідні дані для ТЕО впровадження пальника з технологією ССБВ можуть бути використані при модернізації котлів ТПП-210А.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дунаєвська Н.І., Засядько Я.І., Шупік І.С., Щудло Т.С. Обзор технологий спального биомассы и угля в пыловугельных топках // Энерготехнологии и ресурсосбережение, 2007, № 3, с. 3—8.
2. Biomass Combustion and Cofiring. Mode of access: <http://www.ieabee.nl> (Accessed 14 Mar. 2017).
3. Dayton D.A. Summary of NO_x Emissions Reduction from Biomass Cofiring /Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2002, p. 10. Mode of access: <http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/32260.pdf>.

4. Sloss L. Emissions from cofiring coal, biomass and sewage sludge / IEA Clean Coal Centre, 2010, p. 46. Mode of access: https://www.usea.org/sites/default/files/102010_Emissions%20from%20cofiring%20coal%2C%20biomass%20and%20sewage%20sludge_ccc175.pdf
5. Fernando R. Fuels for biomass cofiring / IEA Clean Coal Centre, 2005, p. 37.
6. Засядько Я.І., Мірошник М.М., Засядько П.Я. Термогравіметричні дослідження бурякового жому // Цукор України, 2012, № 2(74), с. 29—32.
7. Матвейчук А.М. О технологии совместного сжигания бурого угля и соломы в топочных камерах с неподвижным слоем // Відновлювальна енергетика, 2012, № 3 (30), с. 79—83.
8. Dunaievska N., Chernyavskiy M., Shchudlo T. Co-combustion of solid biomass in pulverized anthracite-coal firing boilers // Ukrainian Food Journal, 2016, Vol. 5, p. 748—764.
9. Григорьев В.А., Зорин В.М. Теоретические основы теплотехники. М.: Энергоатомиздат, 1988. — 556 с.

Надійшла 27.03.17;
після доопрацювання 11.05.17

REFERENCES

1. Dunaievska, N., Zasiadko, Ya., Shupik, I. and Shchudlo, T. (2007), “Overview of technology of biomass and coal cofiring in the coal-dust furnaces”, *Energotehnologii i resursoberezhniye*, no. 3, pp. 3-8.
2. Biomass combustion and cofiring, available at: <http://www.ieabcc.nl> (accessed Mar. 14, 2017).
3. Dayton, D. (2002), A summary of NOx emissions reduction from biomass cofiring, Golden: National Renewable Energy Laboratory, pp.1-10, available at: <http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/32260.pdf> (accessed March 14, 2017).
4. Sloss, L. (2010), “Emissions from cofiring coal, biomass and sewage sludge”, *IEA Clean Coal Centre*, pp.1-46, available at: https://www.usea.org/sites/default/files/102010_Emissions%20from%20cofiring%20coal%2C%20biomass%20and%20sewage%20sludge_ccc175.pdf (accessed Mar. 14, 2017).
5. Fernando, R. (2005), “Fuels for biomass cofiring”, *IEA Clean Coal Centre*, p. 37.
6. Zasiadko, Ya.I., Myroshnyk, M.M. and Zasiadko, P.Ya. (2012), “Thermogravimetric research of sugar beet pulp”, *Tsukor Ukrainy*, no. 2 (74), pp. 29-32.
7. Matveichuk, A. (2012), “On technology of cofiring of brown coal and straw in furnaces with immobile layer”, *Vidnovliuvana energetika*, no. 3 (30), pp. 79-83.
8. Dunaievska, N., Chernyavskiy, M. and Shchudlo, T. (2016), “Co-combustion of solid biomass in pulverized anthracite-coal firing boilers”, *Ukrainian Food Journal*, Vol. 5, pp. 748-764.
9. Grigoryev, V.A. and Zorin, V.M. (1988), *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki* [Theoretical principles of heat engineering], Energoatomizdat, Moscow, USSR.

Received 27.03.17;
after revision 11.05.17

N.I. Dunayevska, Ya.I. Zasiadko, P.Ya. Zasiadko, T.S. Shchudlo

**MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESSES
OF BIOMASS AND COAL CO-FIRING IN TPP BOILERS**

A geometric model of the work area of the experimental unit for the combustion and gasification of pulverized coal has been created in the Gambit software. The corrections of the registration of the platinum-platinum-rhodium (PP) thermocouples have been calculated with the help of the integral model of the unit high temperature flow gasification with capacity up to 100 kg per hour of coal in a vertical design (VGP-100V) in experimental conditions of combustion of natural gas. Based on the ANSYS CFX software, a three-dimensional model of processes in the burner with thermochemical preparation of low-reaction coal of TPP-210A boiler of Tripolskaya TPP has been developed. The initial data are presented for the design of a 65 MW burner for the TPP-210A boiler for the implementation of the coal and biomass co-firing technology at TPPs of Ukraine.

Key words: co-firing, biomass, coal, anthracite.

ДУНАЄВСЬКА Наталія Іванівна, канд. техн. наук, директор, пров. наук. співр. Ін-та вугільних енерготехнологій НАН України. В 1975 р. закінчила Київський політехнічний ін-т. Сфера наукових досліджень — термічне перетворення твердих палив.

ЗАСЯДЬКО Ярослав Іванович, канд. техн. наук, професор Національного університету харчових технологій. В 1975 р. закінчив Київський політехнічний ін-т. Сфера наукових досліджень — багатофазні потоки, теплопередача, термодинамічний аналіз, спільне спалювання біомаси з вугіллям.

ЗАСЯДЬКО Павло Ярославович, магістр енергетики, мол. наук. співр. Національного університету харчових технологій. В 2012 р. закінчив Національний технічний університет «Київський політехнічний ін-т». Сфера наукових досліджень — теплопередача, термодинамічний аналіз, CFD-моделювання процесів тепломасообміну.

ЩУДЛО Тарас Сергійович, магістр енергетики, мол. наук. співр. Ін-та вугільних енерготехнологій НАН України. В 2007 р. закінчив Національний технічний університет «Київський політехнічний ін-т». Сфера наукових досліджень — спільне спалювання твердої біомаси з вугіллям.