

Національна академія наук України
Міністерство енергетики та захисту довкілля України
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
ПрАТ «ТЕХЕНЕРГО»
Громадська рада при Міністерстві енергетики та захисту довкілля України
ТОВ DAGAS



XV Міжнародна науково-практична конференція

**ВУГІЛЬНА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА:
ШЛЯХИ РЕКОНСТРУКЦІЇ
ТА РОЗВИТКУ**

Київ 2019

**Національна академія наук України
Міністерство енергетики та захисту довкілля України
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України
Національний технічний університет „Дніпровська політехніка”
ПрАТ „ТЕХЕНЕРГО”
Громадська рада при Міністерстві енергетики та захисту довкілля
України
ТОВ DAGAS**

**ВУГІЛЬНА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА:
ШЛЯХИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА РОЗВИТКУ**

XV Міжнародна науково-практична конференція

ЗБІРКА НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Київ 2019

ЗБІРКА НАУКОВИХ ПРАЦЬ
XV Міжнародна науково-практична конференція

**«ВУГІЛЬНА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА:
ШЛЯХИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ТА РОЗВИТКУ»**

1–2 жовтня 2019 р.

Національна академія наук України
Міністерство енергетики та захисту довкілля України
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
ПрАТ «ТЕХЕНЕРГО»
Громадська рада при Міністерстві енергетики та захисту довкілля України
ТОВ DAGAS

Затверджено до друку Вченою радою
Інституту вугільних енерготехнологій НАН України

Рецензенти:

С. М. Василенко, доктор технічних наук, професор

О. О. Сєрьогін, доктор технічних наук, професор

УДК 621.78.012-37.091.12:005745

ISBN 978-966-2760-98-9

Підписано до друку: 23.09.2019

Формат: 60×84/16. Папір офсетний.

Умов. друк. арк. 15.14. Уч.-видав. арк. 13.02

Друк цифровий. Наклад 80 прим.

Надруковано: ТОВ «Гнозіс»

**ЦИРКУЛЯРНА ЕКОНОМІКА ЯК ШАНС ВИЖИВАННЯ
ШАХТАРСЬКИХ РЕГІОНІВ**

**Амоша О. І., академік НАН України, д.е.н., проф.,
Череватський Д. Ю., к.т.н., с.н.с.**

Інститут економіки промисловості НАН України

Відходи вуглевидобування та вуглезбагачення не можна віднести до стратегічних ресурсів, але за їх допомогою місцевим громадам можна деякий час вистояти на стадії пост-видобування вугілля і підготувати плацдарм для майбутніх господарчих перетворень.

Циркулярна економіка, що у цьому випадку має за основу переробку накопичених десятиліттями, а то і століттями відходів видобутку та збагачення вугілля, вважається головною складовою революційної ідеології "Індустрії 4.0".

Німецька фірма «Hölder», ще у восьмидесятих роках ХХ століття висунула формулу "Відходи збагачення вугілля не проблема, а сировина». За даними інституту ІВЕ НАН України обсяг відходів збагачення, накопичених у районах зосередження шахт, складає понад 190 млн т.

Мапа розташування хвостосховищ із відходами збагачення на території Донецької області, що знаходиться під контролем уряду, наведена на рисунку 1. Діаграма відображає не тільки географічні координати об'єктів (широта та довгота), збагачувальних фабрик, що приурочені до м. Селидове, Покровськ, Добропілля та ін., а й обсяг накопичених в них високозольних вугільних матеріалів (млн т).

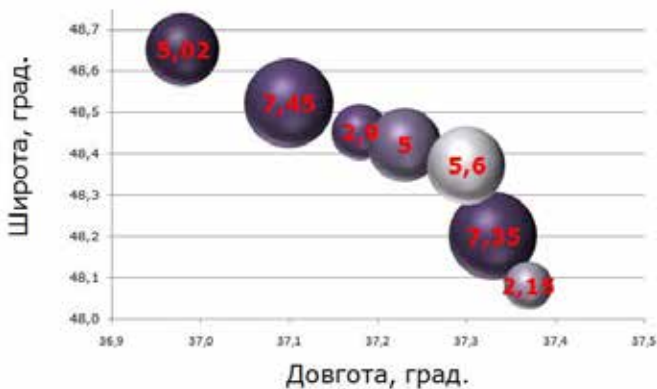


Рис. 1. Мапа сховищ відходів збагачення на підпорядкованій уряду України території Донецької області (без ЦОФ "Свято-Варваринська")

Українські підприємці ще у кінці дев'яностих років ХХ століття довели доцільність переробки відходів збагачення. У спеціалізованій раді Інституту економіки промисловості НАН України з цієї тематики було захищено 2 достатньо "міцних" дисертації на здобуття наукового ступеню кандидата економічних наук. Концерн "Радон" на початку ХХІ століття навіть спеціалізував під перезбагачення хвостовідходів Калінінську ЦОФ в м. Горлівка.

Є й оригінальні вирішення, наприклад, пов'язані із застосуванням тунельних пічок, за якими з вугільного кеку збагачувальних фабрик можна виробляти електроенергію та будівельні матеріали. На жаль, воєнно-політичні процеси на Донбасі перешкодили реалізації компанією Донецьксталь проекту зі створення такого комплексу при ЦЗФ "Свято-Варваринська".

Але переробкою відходів збагачення можливості виживання шахтарських регіонів не закінчуються. Шахтні виробки, які є відходами вуглевидобування, можна використовувати як сховища енергетичних ресурсів. Експерт світового виміру, відомий енергетичний гуру Деніел Єрґін зауважив, що якщо є сучасна чаша Грааля, то це енергетичні сховища.

Найбільш відомим проектом такого роду є перетворення на гідроакumuлюючу електростанцію останньої німецької кам'яновугільної шахти Проспер-Ханіель. Процес акумуляції й вироблення енергоресурсів передбачає підйом води у часи профіциту електроенергії і перепуск рідини через турбіну на глибокі горизонти, коли енергії не вистачає.

Мова йдеться про потужність 200 МВт. Проект, який створюють в іспанській Астурії набагато скромніший – 23 МВт, але і це достатньо потужна й корисна для економіки та енергетики регіону пікова електростанція.

Прем'єр-міністр федеральної землі Північний Рейн-Вестфалія Ханнелоре Крафт найбільш значущим моментом такої трансформації визначила збереження найбільшого центру національного вуглевидобутку в статусі учасника енергоринку.

Ідея вироблення електроенергії з використанням сили тяжіння спонукала уряд Великобританії підтримати розпочатий в Шотландії проект Gravitricity, орієнтований на ревіталізацію колишніх гірничодобувних регіонів країни. Технологія заснована на використанні потенційної енергії, яка трансформується в електричну при опусканні у вертикальному стволі масивного вантажу. Через Державне агентство з інновацій було виділено урядовий грант в розмірі 650 тис. фунтів стерлінгів, достатній для створення до 2020 р. діючої

промислової моделі й пошуку майданчика під повномасштабний зразок.

Суть проекту полягає в підйомі масивного вантажу в період надлишкового енерговиробництва і опусканні вантажу при дефіциті ресурсу з роботою двигунів лебідок в режимі генератора з рекуперацією електроенергії в мережу. У планах Gravitricity створювати гравітаційні системи зберігання енергії потужністю від 1 до 20 МВт. Зараз команда зайнята пошуком підходящих шахт для випробувань. Після того, як технологія Gravitricity буде відпрацьована в старих шахтах, передбачається подальше просування проекту по шляху нарощування потужності установки.

Дослідники з ІГТМ НАН України на прикладі роботи клітьового підйому шахти ім. О. Ф. Засядька довели реальність і доцільність таких систем ще до британського проекту. Але на жаль це поки що не знайшло відгуку ані з боку вітчизняних шахтарів, ані з боку вітчизняних енергетиків.

Із ряду ж сховищ енергетичних ресурсів слід згадати дослідження з бюджетом приблизно 1,4 млн євро консорціуму відомих європейських фірм щодо систем на стислому повітрі.

Світова практика знає два прецеденти акумуляції електрики зі сховищами стислого повітря, але не ті, що пов'язані з глибокими шахтами – дві великі (290 і 110 МВт) пневмоакумулюючі газотурбінні електростанції (ПАГТЕ) – одна поблизу німецького Ханторфа (Huntorf), інша – біля американського Макінтоша (McIntosh, штат Алабама) на базі природних каверн. Електрогенеруючі частини цих станцій знаходяться на денній поверхні, а високооборотні сховища стисненого повітря – під землею на глибині 600 – 800 м. Новий проект визначає доцільність для цього шахтних виробок.

Шахтні енергетичні сховища можуть отримати вигляд енергетичних хабів, навіть континентального значення. Їх створення неможливе без міжнародних консорціумів з інвестування, проектування, побудови та експлуатації енергосховищ.

Створення в шахтарських регіонах економіки на засадах циркулярності потребує вирішення не так техніко-технологічних проблем, скільки інституційних та інвестиційних. Власник відходів збагачення, що не має наміру з їх утилізації, може зовсім загальмувати процеси розвитку циркулярної економіки в регіоні, не дозволити громаді використати свій шанс на виживання в складних умовах припинення роботи шахт.

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АМОНІАКУ НА ВУГІЛЬНІЙ ТЕЦ

Вольчин І. А., д.т.н.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

Необхідність дотримання вимог Директиви 2010/75/EU про промислові викиди щодо граничних значень викидів діоксиду сірки, оксидів азоту і речовин у вигляді суспендованих твердих частинок, недиференційованих за складом (пилу), закладена в Угоді про Асоціацію України та ЄС 2014 р. і в Національному плані скорочення викидів (НПСВ) забруднюючих речовин від великих спалювальних установок, ухваленому розпорядженням Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 № 796-р. Враховуючи високий вміст сірки в українському вугіллі, особливо газових марок, для дотримання нормативу 200 мг/м³ по вихідній концентрації діоксиду сірки на ТЕС і ТЕЦ України потрібно застосовувати технології десульфуризації з ефективністю очищення димових газів не менше 97%. Також важливим питанням є утилізація продуктів сіркоочищення.

Найбільш поширеною в енергетиці світу безвідходною технологією сіркоочищення є мокра вапнякова десульфуризація з примусовим окисленням. Її перевагами є висока ефективність (97%+), використання як сорбенту вапняку, широко розповсюдженого природного мінералу, та отриманням на виході двоководного гіпсу $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, що є будівельним матеріалом. До недоліків слід віднести складний технологічний процес, високі капітальні затрати, високі експлуатаційні затрати, пов'язані з рециркуляцією великої кількості суспензії вапняку та гіпсу, великі затрати води, необхідність застосування «мокрої» димової труби або газо-газових теплообмінників тощо.

Мокра десульфуризація з використанням морської води як сорбенту передбачає видалення усіх продуктів сіркоочищення в море чи океан разом морською водою, яка використовується для охолодження конденсаторів парової турбіни, при цьому забезпечується високий ступінь десульфуризації димових газів. Ця технологія набула поширення в країнах Південно-Східної та Південної Азії, в яких великі теплові електростанції розташовані біля моря.

Мокра амонійна десульфуризація є також високоефективною та безвідходною. Її субпродуктом є сульфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, який являється мінеральним добривом. Завдяки розчинності усіх солей амонію мокрий скрублер в цій технології є меншим, ніж для мокрої вапнякової сіркоочищення,

нижчий ступінь рециркуляції робочого розчину. Недоліком даного методу є складний технологічний процес сепарації сульфату амонію з робочого розчину.

Серед напівсухих технологій сіркоочищення, які мають набагато нижчі капітальні та експлуатаційні затрати, ніж мокрі технології, до безвідходних можна віднести напівсуху амонійну десульфуризацію, розроблену в Інституті вугільних енерготехнологій. Вихідним продуктом буде сухий сульфат амонію, а димові гази на виході з реактора матимуть температуру, що більше ніж на 15 °C вище за водяну точку роси. Амонійна вода подається пневматично в реактор у вигляді крапель за потоком димових газів. За час перебування в реакторі краплі рідини повністю випаровуються за рахунок тепла димових газів, а діоксид сірки практично повністю зв'язується амоніаком в краплях та газовій фазі. Сухий продукт уловлюється в тканинному фільтрі, розташованому після реактора.

Поки амонійні технології сіркоочищення не отримали широкого впровадження в енергетиці світу. Причинами цього є висока токсичність амоніаку (вміст NH_3 в димових газах не повинен перевищувати 5 ppm) та великі обсяги споживання будь-якого сорбенту в енергетиці.

Оскільки основним методом зниження викидів оксидів азоту на ТЕС світу є селективне каталітичне відновлення (СКВ) та селективне некаталітичне відновлення (СНКВ) з використанням амонійних реагентів, то застосування амонійної десульфуризації просто вимагає високої культури виробництва.

У 2012 році 90 великих спалювальних установок, які включені до НПСВ, викинули в повітря більше 1 млн т діоксиду сірки. А в 2028 році вони повинні забезпечити загальний валовий викид сірчистого ангідриду не більше 51 тис. т. Тобто, скорочення становить близько 20 разів. Якщо уявити, що весь видалений з димових газів діоксид сірки (близько 950 тис. т) буде зв'язаний амоніаком, то для цього потрібно в рік 504,7 тис. т NH_3 . Такої кількості амоніаку зараз не виробляє хімічна промисловість України. При цьому має утворитися майже 1,96 млн. т сульфату амонію.

Тому постає питання доцільності спорудження власних заводів з виробництва амоніаку біля ТЕС чи ТЕЦ. Для прикладу розглянемо ТЕЦ, оснащену 5 паровими котлами паропродуктивністю 160 т/год. Вона буде використовувати 4 котли в опалювальний сезон та 2 котли в літній час. В середньому за рік на ТЕЦ працюватиме 3 котли протягом 8000 год.

Для зниження початкової концентрації оксидів азоту NO_x з 1000 мг/м³ до потрібних 200 мг/м³ слід подавати в димові гази 296 мг/м³ амоніаку. Для

досягнення вмісту діоксиду сірки 200 мг/м^3 з початкових 5000 мг/м^3 потреба в амоніаку становить 2550 мг/м^3 . Разом потреба в амоніаку буде 2846 мг/м^3 . При витраті сухих димових газів $200000 \text{ м}^3/\text{год}$ на один котел споживання амоніаку становитиме близько 570 кг/год або 13660 кг/день . Для 5 котлів по 160 т/год водяної пари амоніаку потрібно майже 2850 кг/год або 68300 кг/день . Це вже масштаби промислової установки.

Для 3 котлів, що працюватимуть 8000 год/рік , річна потреба в амоніаку становитиме 13660 т , а в 25% амонійній воді – 54640 т .

Для виробництва амоніаку потрібно мати джерела азоту та водню. Для отримання азоту в промисловості застосовують криогенні установки. Побічним продуктом буде рідкий кисень, кількість якого становитиме 30% від кількості азоту. Водень в промислових масштабах отримують шляхом електролізу води. При цьому також буде утворюватися кисень, якого по масі буде в 8 разів більше, ніж водню. Таким чином, при виробництві 570 кг/год амоніаку буде утворюватися 945 кг/год кисню або близько $660 \text{ м}^3/\text{год}$ в об'ємній витраті.

Цей кисень доцільно використати для покращання умов займання вугільного пилу на ТЕС. Отримані $660 \text{ м}^3/\text{год}$ кисню становлять приблизно 2% усіх потреб кисню на спалювання вугільного пилу для котла паропродуктивністю 160 т/год . Якщо кисень з виробництва амоніаку подавати в первинне повітря, витрата якого становить приблизно 20% від загальної кількості повітря на спалювання, то можна зменшити витрату самого первинного повітря на 10%. При концентрації кисню в повітряно-кисневій суміші вище 21% покращаться умови займання вугільного пилу, знизиться час індукції та зменшиться вміст термічних оксидів азоту через зниження його вмісту в газовому середовищі.

УДК 662.63

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ГОРІННЯ КОКСОЗОЛЬНИХ ЗАЛИШКІВ РІЗНИХ ВИДІВ ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА

Безценний І. В., к.т.н.; Бондзик Д. Л., к.т.н.; Щудло Т. С.;

Дунаєвська Н. І., к.т.н.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

У світовій практиці вугільної генерації протягом останніх десятиліть впроваджується спільне спалювання біомаси з вугіллям або повне заміщення

проектного вугілля твердим біопаливом. Такий перехід обумовлений передусім екологічними чинниками, але для України має місце додатковий – нестача проектного вугілля для ТЕС. На сьогоднішній день наша країна має значний потенціал у виробленні біопалива, а саме деревних та агропелет. Враховуючи суттєві відмінності у швидкості горіння біомаси та вугілля, а також широкий діапазон змін характеристик біомаси, переведення котлоагрегатів вітчизняних ТЕС на повне або часткове спалювання біомаси вимагає розрахунків процесів горіння в паливні котлоагрегатів, для чого необхідно отримати кінетичні характеристик горіння твердого біопалива.

Час вигорання коксового залишку є найдовшим з усіх стадій горіння частинки твердого палива та є визначальним для розрахунку часу вигорання у паливні котлоагрегату, тому авторами було приділено особливу увагу вивченню кінетичних характеристик реагування коксозольного залишку твердого біопалива з киснем повітря. Об'єктами для дослідження було обрано три види біопалива, а саме: пелети з відходів деревообробної промисловості, лущиння соняшника та соломи пшениці. Технічний аналіз наведений у таблиці 1.

Таблиця 1. Технічний аналіз досліджуваних палив

Найменування проби	Загальна волога на робочий стан палива W_t^r , %	Зольність на сухий стан палива A^d , %	Вихід летких речовин V^{daf} , %
Пелета пшениці	9,0	12,4	84,2
Пелета сосни	6,8	0,8	86,1
Пелета лущиння соняшника	10,7	5,8	80,7

Кокс біопалива готувався у два етапи. Спочатку, подрібнена пелета прогрівалась до температури 750 °С та витримувалась близькою години у реторті без доступу кисню до зразка. На цьому етапі з біомаси виходило близько 70% летких речовин. Для повного виходу летких після охолодження напівкокс близько 30 хв. витримувався у кварцовому реакторі киплячого шару в потоці інертного газу при температурі 900 °С. Розмір частинок коксу 1–1,6 мм.

Дослідження кінетичних характеристик взаємодії коксових залишків вказаних видів твердого біопалива з киснем повітря проводились на установці Інституту вугільних енерготехнологій НАН України «Піроліз-М», яка являє собою реактор з кварцового скла, розміщений в трубочатій електронагрівальній

печі. Знизу реактора подається газ-реагент, а в горішній частині знаходяться системи введення наважки досліджуваного матеріалу та відведення газів. Для газового аналізу використовувався магнітостатичний мас-спектрометр МХ-1215.

Експеримент починався, коли наважка досліджуваного коксу масою близько 0,5 г через шлюзову систему вкидалась в розігрітий до заданої температури реактор (550, 650, 750 та 850 °С). Протягом експерименту вимірювались параметри: температура в зоні реагування, витрата газу-реагенту та склад продуктів згорання.

За газовим аналізом визначались питома швидкість горіння коксозольного залишку W_{m0} (1/с). Враховуючи значне збільшення температури під час горіння частинки відносно температури газів та стінки реактора, розраховувався перегрів частинки з теплового балансу із врахуванням конвективного та радіаційного теплообміну.

Питома швидкість горіння для широкого діапазону температур, включає в себе кінетичну ($W_{кін}$, 1/с) та дифузійну ($W_{диф}$, 1/с) складові і має вигляд:

$$W_m = 1 / ((1/W_{кін}) + (1/W_{диф})). \quad (1)$$

$W_{кін}$ визначалась з рівняння (1). Після чого для коксозольних залишків кожного виду біомаси будувалась залежність $W_{кін} = f(T, K)$ з якою за відомою моделлю ядра, що стискається, знаходились кінетичні константи швидкості, які наведені в таблиці 2. Уявна густина частинок коксозольного залишку (ρ_T^K , кг/м³) для трьох видів біомаси приймалась рівною 877 кг/м³, та отримана розрахунково на основі літературних даних для деревини сосни і її коксозольного залишку та відомого значення уявної густини пелет.

Таблиця 2. Кінетичні характеристики швидкості взаємодії коксозольного залишку пелет сосни, соломи пшениці та лушпиння соняшника з киснем повітря (стехіометричний коефіцієнт перерахунку маси кисню, що прореагував у масу вуглецю, що прореагував $\beta = 0,45$; середній розмір $\delta = 1,3$ мм)

Коксозольний залишок пелет	k_0' , м ³ /(кг·с)	k_0'' , м/с	E_a , кДж/моль
Сосни	11,32	16,48	71,21
Соломи пшениці	15,94	23,21	68,01
Лушпиння соняшника	15,83	23,05	70,72

Отримані кінетичні характеристики горіння коксозольного залишку можна використовувати для розрахунку швидкості горіння пелет, зокрема за

допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, в паливні котлоагрегатів.

УДК 622.749.39

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ДОМЕННОГО КОКСА

¹Мирошниченко И. В.; ²Мирошниченко Д. В., д.т.н., проф.;

³Шульга И. В., к.т.н.; ³Балаева Я. С., к.т.н.

1 – ПАО «МК «Азовсталь»;

**2 – Национальный технический университет «Харьковский
политехнический институт»;**

**3 – Государственное предприятие «Украинский государственный
научно-исследовательский углехимический институт (УХИН)»**

В работе [1] отмечено, что перспективы развития черной металлургии и влияние, которое оказывают на нее потребность в экономии энергоресурсов и сокращении выброса углекислого газа, во многом зависят от технологических процессов в производстве чугуна и кокса. В условиях ограниченных ресурсов коксуемых углей и все более жесткого экологического законодательства производители кокса и чугуна в последние годы объединяют усилия для совершенствования технологии коксования на основе технических требований, которые предъявляются к качеству и свойствам кокса в доменной печи [2]. Около 70% всех затрат энергии в черной металлургии приходится на энергопотребление в системе производства чугуна, в том числе около 50% – в доменных печах, около 15% – в производстве кокса, около 5% – в производстве агломерата и около 1% – в производстве окатышей [3–5]. Это указывает на тот факт, что производство чугуна располагает самым большим потенциалом энергосбережения в черной металлургии, а процессы в доменных печах и в коксовом производстве отличаются наибольшими энергоемкостью и потреблением углерода [6].

В свою очередь, около 55–65% массы кокса сгорает как топливо в зоне циркуляции перед фурмами, что говорит о необходимости повышать содержание углерода в коксе и его теплоту сгорания.

На основании проведенных нами исследований [7, 8] были сделаны следующие основные выводы:

1. Максимальная величина высшей теплоты сгорания доменного кокса

достигается при коксовании угольных шихт (вне зависимости от величины их насыпной плотности), характеризующихся следующим набором показателей качества: $R_0 = 0,913\text{--}0,942\%$; $V^{\text{daf}} = 30,9\text{--}31,0\%$; $C^{\text{daf}} = 83,8\%$; $H^{\text{daf}} = 5,01\text{--}5,02\%$; $O^{\text{daf}}_d = 8,42\text{--}8,45\%$.

2. Увеличение насыпной плотности угольных шихт, характеризующихся одинаковым набором показателей качества, с 800 до 1150 кг/м³ приводит к росту высшей теплоты сгорания доменного кокса на 0,05–0,12 МДж/кг.
3. Экспериментально установлена и теоретически обоснована возможность некоторого увеличения теплоты сгорания кокса из окисленных углей. Необходимым условием практической реализации этой возможности является применение разработанного нами ранее комплекса мероприятий по рациональному использованию окисленных углей для коксования, прежде всего с целью обеспечения требуемого качества кокса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Антонов А. В. Качество кокса и технологии коксования на основе более глубокого понимания поведения кокса в доменной печи // Новости черной металлургии за рубежом. 2017. №1.– С. 6 – 11.
2. Kejiang Li, Mansoor B., Jianliang Z et al. Advanced coke quality characterization and cokemaking techniques based on in depth understanding of coke behavior inside blast furnace // AIS Tech 2016. Proceeding 16–19th May 2016. Pittsburgh, Pennsylvania, USA. P. 273 – 283.
3. Monaghan B.J., Drain P.B., Chapman M.W., Nightingate R.J. Reactivity of coke ash on aluminosilicate blast furnace hearth refractories // ISI j International. 2014. Vol. 54. P. 810 – 819.
4. Guo Z., Fu Z. Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China // Energy. 2010. Vol. 35. P. 4356 – 4360.
5. Брагинский А. М. Интегрированные энергосберегающие технологии в производстве чугуна.– Харьков. Коллегиум. 2011. 380 с.
6. Zhaug K.Li., Liu Z., Waug T., Ning X., Zhoug J., Xu R., Wang G., Ren S., Yang T. Zinc accumulation and behavior in Tuyere coke // Metallurgical and materials Transactions. 2014. Vol. 45. P. 1581 – 1588.
7. Мирошниченко И. В., Мирошниченко Д. В., Шульга И. В., Балаева Я. С., Перейма В. В. Теплота сгорания кокса. Сообщение 1. Прогноз // Кокс и химия. 2019. №4. С. 19 – 26.

8. Мирошниченко И. В., Мирошниченко Д. В., Шульга И. В., Балаева Я. С. Теплоота сгорания кокса. Сообщение 2. Влияние плотности угольной шихты // Кокс и химия. 2019. №6. С. 16 – 21.

УДК 662.612.3

ГРАНИЦІ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ ДЕРЕВОПОДІБНОЇ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ

Квіцинський В. О.; Кривошеєв С. І., к.т.н.; Макарчук В. М., к. ф.-м.н.;
Марушак С. В.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

В роботі [1] для аналізу процесу взаємодії кисню з коксовим залишком запропонована модель багаторівневої деревоподібної пористої структури (ДПС) та отримані аналітичні вирази для ефективних констант швидкості реакції в порах та на контурній поверхні частинки, розподілу реагентів в порах та емісії продуктів реакції. В моделі покладалося: а) в порах та їх відгалуженнях діє Кнудсенівський механізм дифузії ($L \gg r$, довжина вільного пробігу молекул $= 2r$, L , r – довжина та радіус пори), б) адсорбційна рівновага на поверхні пори описується лінійною ізотермою, в) хімічні реакції на поверхні та у відгалуженнях пор не вносять великого збурення в концентрації реагентів. Враховувалась вторинна відновлювальна реакція CO_2 з вуглецем та її вплив на емісію продуктів реакції.

В роботі, що пропонується, на відміну від [1], враховано дві окремі реакції кисню з вуглецем та обмеження реакційного потоку в пори, визначені границі застосування моделі, порівняно вплив пористої структури на швидкість гетерогенних реакцій O_2 та CO_2 з вуглецем. Константи реакцій взяті з [2]:

$\text{O}_2 + \text{C} = \text{CO}_2$, $K_{12} = 1,6 \cdot 10^5 \cdot \exp(-166 \cdot 10^3 / RT)$ м/с; $Q_{12} = 395$ кДж/моль (O_2) /1/
 $\text{O}_2 + 2\text{C} = 2\text{CO}$, $K_{13} = 4,6 \cdot 10^7 \cdot \exp(-218 \cdot 10^3 / RT)$ м/с; $Q_{13} = 219$ кДж/моль (O_2) /2/
 $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$, $K_{23} = 3,2 \cdot 10^7 \cdot \exp(-275 \cdot 10^3 / RT)$ м/с; $Q_{23} = -175,5$ кДж/моль (CO_2) /3/
 K_{12}, K_{13}, K_{23} – константи швидкості реакцій /1,2,3/ для щільної поверхні; Q_{12}, Q_{13}, Q_{23} – теплота реакцій. Індексами 1, 2, 3 позначені, відповідно, O_2 , CO_2 та CO .

Умова «а» частково порушується на вхідній ділянці пори. Щоб це не впливало суттєво на розрахунки реагування в порі, глибина проникнення реагенту λ має бути набагато більшою діаметру: $\lambda = r(V/3K)^{1/2} \gg 2r$ (V – теплова швидкість молекул реагенту, K – константа швидкості реакції на поверхні),

звідси $K \ll V/12$. Ця нерівність також задовольняє умові «в». Для кисню розв'язок останньої нерівності дає: $K=K_{13}+K_{23}=K_1 < 100 \text{ м/с}$, $T < 2000 \text{ К}$. Для діоксиду вуглецю умова $\lambda \gg 2r$ виконується при всіх реальних температурах спалювання вугілля.

В моделі ДПС отвори пор на зовнішній поверхні розглядались як ділянки з відмінною від щільної поверхні реакційною здатністю, а середня по контурній поверхні ефективна константа швидкості реакції K_S представлена у вигляді:

$$K_S = (1-\theta-\varphi-\psi)K + \theta K_\theta + \varphi K_\varphi + \psi K_\psi = K(1-\theta-\varphi-\psi + \theta M_\theta + \varphi M_\varphi + \psi M_\psi) = K M_S \quad (1)$$

θ , φ , ψ – частки площі, що займають на поверхні отвори відповідно мікро-, мезо- та макропор (дорівнюють їх об'ємним часткам в коксовому залишку), K_θ , K_φ , K_ψ – ефективні константи швидкості реакції сполуки відповідно в мікро-, мезо- та макропорах, які віднесені до одиниці площі вхідного отвору. Ефективні константи для пор в (1) представлені як добутки константи K та відповідних множників M , які є функціями від безрозмірних параметрів процесу реагування в порі – $(V/K), (L/r), \theta, \varphi, \psi$ та відображають вплив кінетики та структури на швидкість реакції:

$$K_\theta = K M_\theta, \quad M_\theta(X, g) = 2X \text{th}(g/X), \quad (2)$$

$$K_\varphi = K M_\varphi, \quad M_\varphi(X, g, \theta) = 2X(1-\theta + \theta M_\theta)^{1/2} \text{th}[g(1-\theta + \theta M_\theta)^{1/2}/X], \quad (3)$$

$$K_\psi = K M_\psi, \quad M_\psi(X, g, \theta, \varphi) = 2X(1-\theta-\varphi + \theta M_\theta + \varphi M_\varphi)^{1/2} \text{th}[g(1-\theta-\varphi + \theta M_\theta + \varphi M_\varphi)^{1/2}/X], \quad (4)$$

$X(T) = [V(T)/3K(T)]^{1/2}$, g – середнє значення L/r ,

При $g \rightarrow 0$ значення мультиплікаторів прямують до нуля, тому що співвідношення (2–5) не враховують реакцію на торцевій поверхні пори (отримані за умов $L \gg r$) і не можуть застосовуватись при $L = 0$.

$K_S = K M_S$, $M_S = 1 - \theta - \varphi - \psi + \theta M_\theta + \varphi M_\varphi + \psi M_\psi$ – множник, що показує в скільки разів ефективна поверхня більше контурної. При $X \gg g$, ефективна поверхня максимальна (дорівнює доступній) і залежить тільки від параметрів структури:

$$\max[M_S] = M_{Sm}(g, \theta, \varphi, \psi) = 1 + (2g-1)[\theta + \varphi + \psi + 2g(\theta\varphi + \theta\psi + \varphi\psi) + 4g^2\theta\varphi\psi] \quad (5)$$

З виразу (5) випливає, що доступна поверхня ДПС зростає з g та часткою пор $(\theta + \varphi + \psi)$ і сильно залежить від їх розподілу по рівням структури.

При виконанні умов ($g \gg 1$, $K < V/12$) $M_\theta, M_\varphi, M_\psi > 1$, відповідно ефективні константи K_θ , K_φ , K_ψ більші за K , оскільки враховують реагування на всій поверхні пори, але віднесені до площі вхідного отвору. В той же час, потік молекул реагенту в пору не може перевищувати хаотичний потік на отвір – $K_\theta, K_\varphi, K_\psi < V/4$. Розрахунки по (2–4) при $T > 1400 \text{ К}$ давали надто високі швидкості реакції кисню в мезопорах та макропорах, а при $T > 1650 \text{ К}$ і в мікропорах. Застосування граничних умов третього роду для масообміну з

порами враховує це обмеження. Різниця хаотичних потоків O_2 з газового середовища на отвір та з отвору дорівнює потоку в мікропорі, обумовленому хімічними реакціями:

$$\pi r^2 (n_{1S} - n_{10}) V_1 / 4 = \pi r^2 q_{10} = \pi r^2 n_{10} K_{10}$$

n_{10} – концентрація кисню в площині вхідного отвору пори, n_{1S} – концентрація O_2 біля поверхні коксового залишку на відстані вільного пробігу молекули кисню, q_{10} – густина потоку кисню в мікропорі.

Виключаючи з рівняння n_{10} , отримуємо:

$$n_{1S} (V_1 / 4) K_{10} / [K_{10} + V_1 / 4] = n_{1S} K_{10}^*,$$

K_{10}^* – ефективна константа, що враховує обмеження потоку в порі:

$$K_{10}^* = (V_1 / 4) K_{10} / [K_{10} + V_1 / 4] = K_1 M_{10}^*, \quad M_{10}^* = M_{10} / [1 + 4 M_{10} K_1 / V_1] \quad (6)$$

Подібними послідовними замінами в виразах (2–4) були отримані ефективні константи швидкості реакції O_2 і CO_2 для контурної поверхні K_{1S}^* і K_{2S}^* , які враховують обмеження масообміну в порах на рівні хаотичного потоку:

$$K_{1S}^* = K_1 (1 - \theta - \varphi - \psi + \theta M_{10}^* + \varphi M_{1\varphi}^* + \psi M_{1\psi}^*),$$

$$K_{2S}^* = K_2 (1 - \theta - \varphi - \psi + \theta M_{20}^* + \varphi M_{2\varphi}^* + \psi M_{2\psi}^*)$$

Рис. 1 демонструє результат корекції для мікропори ефективної константи K_{10} . На рис. 2 приведено залежність відношення ефективних констант K_{2S}^* / K_{1S}^* для контурної поверхні від оберненої температури для різних модельних коксів. Видно, що відношення відрізняються від K_2 / K_1 (крива 1) і суттєво залежать від параметрів пористої структури. В той час, як відношення K_2 / K_1 в вибраних координатах відображається лінією, близькою до прямої, K_{2S}^* / K_{1S}^* в області температур 1200–1800 К має широкий максимум і може на 1–2 порядки перевищувати відношення K_2 / K_1 . Це тому, що в згаданому температурному діапазоні суттєво відрізняються ефективні поверхні реагування (глибина проникнення в пори) кисню та діоксиду вуглецю. При зростанні температури кисень раніше «витісняється» з пор, в той час як CO_2 проникає на значну глибину. Ефект зростає із збільшенням доступної внутрішньої поверхні (із збільшенням геометричного фактора g , об'ємної частки пор θ , φ , ψ та ускладненням структури). В області низьких температур, де внутрішня поверхня коксового залишку однаково доступна для CO_2 і O_2 , відношення K_{2S}^* / K_{1S}^* співпадає з відношенням K_2 / K_1 . При температурах $T > 2000$ К, коли обидві сполуки «витісняються» з пор і вплив внутрішньої поверхні зменшується, відношення ефективних констант для контурної поверхні знову сходиться до значення K_2 / K_1 .

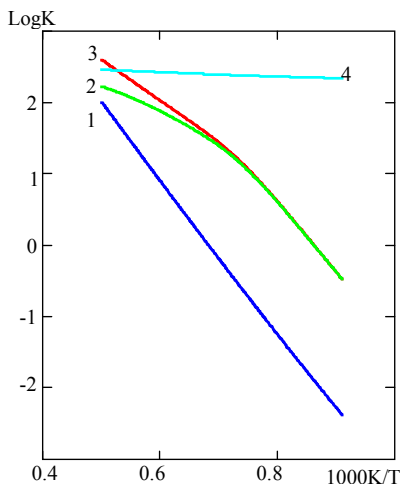


Рис. 1

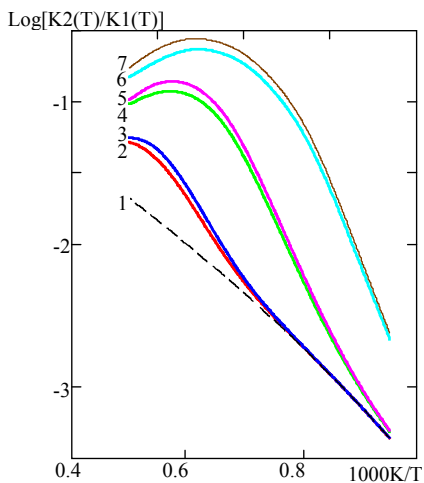


Рис. 2

Рис. 1. Температурні залежності констант швидкості реакції в мікропорі, $g = 40$:
 1 – $K_1(T)$, 2 – $K_{10}^*(T)=K_1(T)M_{10}^*(T)$, 3 – $K_{10}(T)=K_1(T)M_{10}(T)$, 4 – $V_1(T)/4$

Рис. 2. Відношення ефективних констант швидкості реакції діоксиду вуглецю та кисню з коксовим залишком в залежності від оберненої температури:

- 1 – K_2/K_1 , ($\theta=\varphi=\psi=0$, щільна поверхня), 2 – $K_{2S}/K_{1S}=(K_2/K_1)(M_{2S}/M_{1S})$,
 3 – $K_{2S}^*/K_{1S}^*=(K_2/K_1)(M_{2S}^*/M_{1S}^*)$, ($g=20$, $\theta=0,1$, $\varphi=0$, $\psi=0$), 4 – K_{2S}/K_{1S} ,
 5 – K_{2S}^*/K_{1S}^* , ($g=40$, $\theta=0,1$, $\varphi=0,05$, $\psi=0,03$), 6 – K_{2S}/K_{1S} , 7 – K_{2S}^*/K_{1S}^* , ($g=100$,
 $\theta=0,1$, $\varphi=0,1$, $\psi=0,1$)

Відношення швидкості реакції CO_2 і O_2 для контурної поверхні дорівнює $n_{2S}K_{2S}^*/n_{1S}K_{1S}^*$, n_{2S} – концентрація CO_2 біля поверхні. В діапазоні температур 1200–1800 К концентрації O_2 і CO_2 біля поверхні для частинок 10–20 мкм співпадають з концентраціями в газовому середовищі, а на концентрацію реагентів біля частинок великого розміру впливає зовнішній масообмін, а також емісія CO_2 з пор та поверхні внаслідок реакції /1/. Як показали оцінки [3], врахування зовнішнього масообміну підвищує відносну швидкість відновлювальної реакції /3/ в газах, де присутні обидві компоненти.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Квіцинський В. О., Кривошесв С. І., Марущак С. В. Вплив пористої структури коксу на швидкість реакцій горіння. Стационарна модель // Углекимический журнал – 2017, № 6, с. 16–28.

2. Annamalai A., Ryan W., Interactive processes in gasification and combustion—II. Isolated carbon, coal and porous char particles // Progress in Energy and Combustion Sciens – 1993, v.19, N5, p.383–446.
3. Квіцинський В. О., Кривошеєв С. І., Макарчук В. М., Марущак С. В. Вплив вторинної реакції CO_2 з внутрішньою поверхнею на рівноважну температуру частинки коксового залишку в димових газах // Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку», Київ 2018, с. 39–43.

УДК 620.9.338.242.4

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ПОГОДНИХ УМОВ НА ПАРАМЕТРИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ОЕС УКРАЇНИ

Джигун О. М., к.т.н.

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України

На експлуатаційні режими функціонування високовольтних ліній електропередачі суттєво впливають кліматичні особливості району, в якому прокладено лінії: температура і вологість повітря, швидкість і напрямок вітру, опади та їх вид (сніг, дощ), а також інші види атмосферних явищ (ожеледь, наморозь). Характер клімату будь-якого району може бути встановлений в результаті статистичної обробки систематичних багаторічних метеорологічних спостережень, на підставі яких робиться вивчення причин виникнення тієї або іншої погоди, її стійкості і мінливості в різну пору року. Такі спостереження роблять на метеорологічних станціях і постах у багатьох пунктах України [1].

Температура повітря позначається на роботі повітряної лінії внаслідок прямого впливу на ступінь натягу і провисання дротів і тросів. Особливо важливе значення мають величини максимальної, мінімальної та середньорічної температури. Зміна температури протягом доби називається добовим ходом температури, а протягом року – річним ходом температури. Добовий хід температури характеризується величинами температури, визначеними в певні терміни спостережень протягом доби, в тому числі максимальними T_{\max} і мінімальними T_{\min} значеннями температур, а також різницею між ними, яка називається добовою амплітудою температури повітря ($T_{\max} - T_{\min}$).

Початкові дані для розрахунку параметрів високовольтних ліній електропередачі з урахуванням впливу температури і вологості повітря можна знайти в науково-дослідних звітах і Інтернет-ресурсах [1–4]. Відомо, що мінімальне добове значення температури повітря досягається приблизно через 15 хвилин після сходу сонця, а максимальне значення – о 15-й годині. Метод побудови комплексних сонячних карт дає можливість отримати відповідні значення для багатьох населених пунктів, для яких відомі середньомісячні температури та добові амплітуди температур (таблиця 1).

Розрахунок параметрів високовольтних ліній електропередачі з урахуванням впливу температури і вологості повітря здійснюється за допомогою операторів і функцій середовища Excel. При цьому час сходу сонця для кожної лінії визначається як середнє значення для 5, 15 і 25 числа кожного місяця.

Таблиця 1. Час сходу сонця, добова амплітуда температури та середньомісячна температура повітря

Номер вузла	Лінія	Місяць	Час t_{\min}	$A=T_{\max}-T_{\min}$	$T_{\text{ср.міс}}$
N_1	Назва 1	Січень	x	x	x

N_n	Назва n	Грудень	x	x	x

В таблиці 2 наведено характеристику вузлів електричної мережі: кожен вузол N_k електричної мережі належить певному регіону RN_k і енергосистемі PS_k , в яких він розташований. В подальшому ця інформація використовується у формульних розрахунках, а також передається у вихідний файл у вигляді списку вхідних та вихідних вузлів ліній електропередачі.

Таблиця 2. Характеристика вузлів електричної мережі ОЕС України

Номер вузла	Назва регіону	Назва енергосистеми
N_1	RN_1	PS_1
N_2	RN_2	PS_2
...
N_n	RN_n	PS_n

Для заданих часу доби, місяця та вологості повітря автоматизовано розрахунок значення середньої температури повітря і активного опору високовольтних ліній електропередачі. При цьому використано наступні Excel-функції: INDEX, MATCH і умовний оператор IF. За допомогою функцій INDEX, MATCH в таблиці 1 знаходимо шукані значення часу сходу сонця,

амплітуди температур та середньомісячної температури повітря, що відповідають заданим користувачем часу доби і місяцю, для яких здійснюється розрахунок параметрів високовольтних ліній електропередачі.

У [3] запропоновано функцію зміни періодичного кліматичного параметра, що має один максимум і один мінімум в межах періоду, за значеннями її екстремумів за допомогою синусоїдальної функції (таблиця 1). Використання такої негладкої функції дає змогу для будь-якого заданого моменту часу t доби визначити характерну температуру навколишнього середовища та використати її для обрахунку відповідного активного опору лінії за допомогою формули

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)],$$

де R_0 – активний опір одного кілометра проводу певної марки за температури T_0 , Ом/км; T_0 – температура проводу, за якої наведено його питомий опір, °С; T – температура навколишнього середовища, °С (приймається середня температура для кожного місяця для регіонів відповідно до СОУ-Н МПЕ 40.1.20.507 або СНІП 2.01.01); α – температурний коефіцієнт.

Значення граничних струмових навантажень ліній електропередачі представляються довідково у табличному вигляді для фіксованих значень температури повітря. Приймаючи до уваги відомі значення номінальної напруги на лініях, граничне навантаження кожної лінії можна представити у вигляді апроксимуючого поліному другого порядку для потоку потужності, тобто у вигляді

$$y(T) = a_i T^2 + b_i T + c_i,$$

де a_i , b_i та c_i – коефіцієнти апроксимації.

В результаті розрахунку отримано таблицю 3 («Вихідна інформація»), кожний рядок якої містить номер лінії, а також відповідні їй параметри: вхідний та вихідний вузли, активний і реактивний опір, напруга, обмеження по потужності. Отримані дані можна використовувати для моделювання рівноважного стану ринку електроенергії в різних погодних умовах.

Таблиця 3. Вихідна інформація

Номер лінії	Номера вузлів		Активний опір	Реактивний опір	Напруга	Обмеження по потужності
	Вхід	Вихід				
1	N_{i1}	N_{j1}	R_1	X_1	V_1	P_1
2	N_{i2}	N_{j2}	R_2	X_2	V_2	P_2
...
m	N_{im}	N_{jm}	R_m	X_m	V_m	P_m

Представлена модель обчислення параметрів високовольтних ліній електропередачі в середовищі Excel забезпечує отримання значень активного опору та граничних навантажень ліній електропередачі для різних температури та вологості повітря, а також заданих користувачем значень часу характерної доби обраного місяця та вологості повітря. Така модель обчислень використовується в системі моделювання рівноважного стану ринку електроенергії [5].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. <https://ukrainian.wunderground.com/history/>
2. <http://voshod-solnca.ru/>
3. Сергійчук О. В. Побудова комплексних сонячних карт за нормативними кліматичними даними // Сучасні проблеми моделювання. – 2014.– Вип. 2.– С. 149–153.
4. Розроблення сценаріїв зміни кліматичних умов в Україні на середньо- та довгострокову перспективу з використанням даних глобальних та регіональних моделей. Звіт НДР. – Київ: 2013.– 135 с.
5. Саух С. Є., Джигун О. М. Агрегована модель мережі міжсистемних та міждержавних ліній електропередачі ОЕС України // Зб. наукових праць Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова.– Київ – ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України. Моделювання та інформаційні технології. – Київ – ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України. – 2017, Випуск. 78.– С. 3–9.

УДК 662.76

ГАЗИФИКАЦИЯ УГЛЯ В ЦИКЛАХ НА ОСНОВЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Богатова Т. Ф., к.т.н.; Рыжков А. Ф., д.т.н.;
Осипов П. В.; Чернова М. Б.; Бунькова О. И.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

В настоящее время тепловые станции на угле для выработки электрической энергии используют в качестве рабочего тела водяной пар. Технологии, предполагающие использование пара сверхкритических параметров (35–37,5 МПа, 700–720 °С), длительное время остаются на стадии лабораторных исследований специальных материалов для котлов и паровых турбин [1]. Сохраняющаяся необходимость увеличения эффективности ТЭС,

перехода на безотходные технологии приводит к поиску альтернативных решений, к которым можно отнести энергетические циклы на основе сверхкритического диоксида углерода ($s\text{CO}_2$) [2]. Исследования CO_2 как рабочего тела начинались в 50-х годах прошлого столетия в работах отечественных и зарубежных авторов. Критические параметры CO_2 (7,4 МПа, 31 °С) позволяют эффективно использовать его в энергетических циклах, при этом рассматривают два основных подхода:

1. цикл Брайтона с замкнутым контуром, где происходит косвенный нагрев $s\text{CO}_2$ за счет различных источников тепла (органическое топливо, солнечная энергия и др.);
2. полузакнутый цикл Брайтона, где происходит прямое сжигание природного газа или синтез-газа в кислороде с получением $s\text{CO}_2$.

С точки зрения интеграции технологии газификации угля в цикл на основе сверхкритического диоксида углерода $s\text{CO}_2$ перспективным выглядит цикл Аллама, который является примером второго подхода эффективного использования диоксида углерода в энергетических циклах (рис. 1). Пилотная установка мощностью 50 МВт (тепловых) на основе данного цикла на природном газе находится в стадии строительства в США [3].

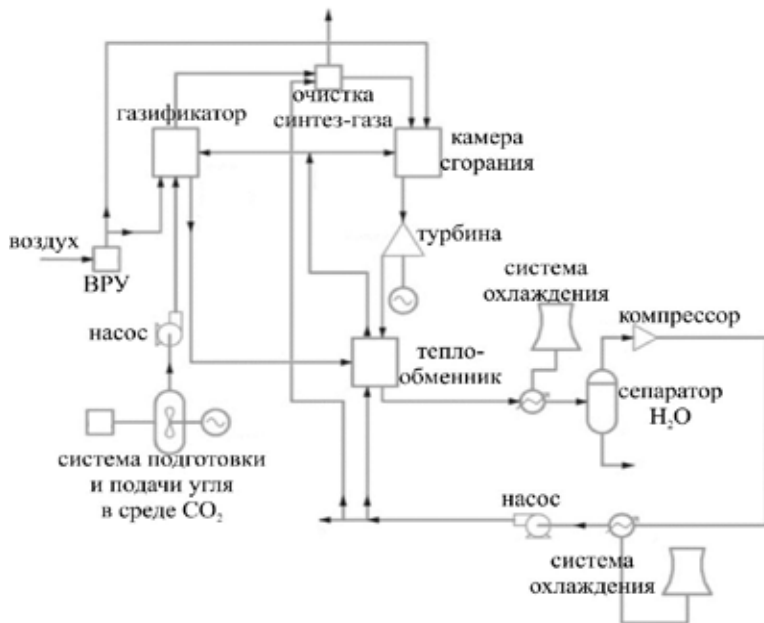


Рис. 1. Цикл на основе $s\text{CO}_2$ с газификацией угля [4]

В данной работе проведено сравнение характеристик твердотопливного цикла Аллама и схем на основе *IGCC*. Проанализированы предлагаемые решения по газификатору для циклов sCO_2 , а также особенности газификации угля в среде CO_2 при атмосферном и повышенном давлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Di Gianfrancesco, A. Materials for ultra-supercritical and advanced ultra-supercritical power plants (2016). P. 875.
2. Mecheri, M., Le Moullec, Y. Supercritical CO_2 Brayton cycles for coal-fired power plants (2016) *Energy*, 103, pp. 758-771.
3. Xijia Lvu Allam cycle coal - a novel clean coal supercritical CO_2 power cycle (2019) *The 9th International Symposium on Coal Combustion*, pp.86
4. Allam R.J., Palmer M.R. and et al. High Efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions including carbon dioxide (2013) *Energy Procedia*, 37, pp. 1135-1149.

УДК 621.311.22

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕСУРСООЩАДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДІЮЧИХ ТЕС

Черноусенко О. Ю., д.т.н., проф.; Пешко В. А., к.т.н.;

Риндюк Д. В., к.т.н., доц.; Горяженко В. Ю.

**Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

На поточному етапі розвитку енергетичної галузі України, гострим та пріоритетним завданням є обґрунтування доцільності та можливості продовження експлуатації основного генеруючого обладнання теплових електростанцій [1]. Однак, просте продовження терміну експлуатації не дозволить забезпечити високе залишкове напрацювання та не здатне надати достатнього часу для технічного переозброєння енергетики України. Доцільним є застосування методів управління ресурсом високотемпературних елементів, що дозволяють уповільнити темпи накопичення пошкоджуваності в основному металі енергетичного обладнання [2–3].

Через нестачу маневрових потужностей в загальному енергогенеруючому балансі України, часто пилувугільні блоки потужністю 200–300 МВт

залучаються до роботи в напівпікових та пікових режимах роботи [4]. Тому, в даній роботі розглядається задача управління ресурсом старіючого обладнання ТЕС за рахунок прогнозування найбільш раціональних ресурсоощадних режимів роботи.

Вирішення даної задачі потребує:

- накопичення та статистичної обробки даних щодо напрацювання конкретних енергоблоків ТЕС (загальне число пусків та дольовий розподіл для різних теплових станів, тривалість роботи на різних електричних навантаженнях, тощо);

- визначення допустимого числа циклів за різними типами пусків на підставі технічного аудиту і даних щодо реальних умов експлуатації за весь період роботи обладнання, а також діагностичного контролю основного металу;

- створення математичної моделі прогнозування раціональних ресурсоощадних режимів роботи та її програмної реалізації.

Дана модель складається з трьох основних частин:

1. Аналітична модель описує закономірності впливу напружено-деформованого стану високотемпературних елементів обладнання на накопичену пошкоджуваність за механізмом малоциклової втоми та довготривалої міцності, а також формулює задачу пошуку оптимального розподілу режимних параметрів роботи енергоблоку.

2. Алгоритмічна модель містить в собі функціональні залежності між основними величинами в блоках препроцесору, солвера та постпроцесору, а також градієнтні (Ньютона) або безградієнтні (Зейделя-Гауса) алгоритми пошуку екстремальних значень.

3. Числова модель пов'язує між собою основні статистичні дані щодо експлуатації енергоблоку та результати розрахунків ресурсних показників для типових режимів роботи обладнання з метою оцінки накопиченої пошкоджуваності та прогнозування раціональних режимів (рис. 1).

Блок прогнозування оцінює індивідуальні ресурсні показники для усіх можливих майбутніх режимів роботи протягом подальших років експлуатації. Так, між двома діаметрально протилежними режимами: повністю базовим (за якого річне напрацювання наближається до максимуму $T \rightarrow \max$, а число пусків протягом року є мінімальним $n \rightarrow \min$), а також повністю піковим ($T \rightarrow \min$, $n \rightarrow \max$) розглядаються усі можливі проміжні режими роботи. Додатково для кожного вказано режиму розглядаються різні відсоткові розподіли чисел пуску з різних теплових станів (холодного, неостиглого, гарячого). Таким чином,

формуються тисячі різних варіантів режимної експлуатації обладнання, для кожного з яких розраховуються ресурсні показники енергоблоку.

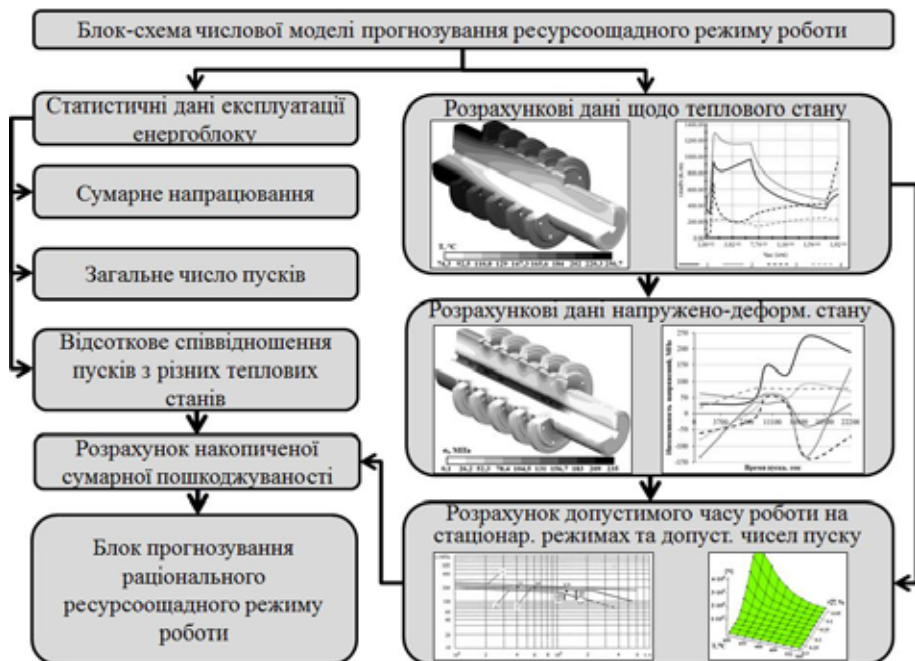


Рис. 1. Блок-схема числової моделі прогнозування режимів роботи

Розглянута математична модель пошуку раціональних ресурсоощадних режимів роботи дозволяє надавати індивідуальні рекомендації щодо режиму експлуатації обладнання з метою забезпечення максимального залишкового напрацювання енергоблоку. Збільшення залишкового напрацювання з застосуванням описаної вище методики може сягати 30%, в залежності від накопиченої пошкодженості і типу енергетичного устаткування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Re-Extension of 200 MW Turbine Cast Casing Service [Text] / Olga Yu. Chernousenko, Dmitriy V. Ryndyuk, Vitaliy A. Peshko // Journal of Mechanical Engineering. – Kharkiv, 2019. – Volume 22, № 2. – pp. 14–20.
2. Comprehensive rotor service life study for high & intermediate pressure cylinders of high power steam turbines [Text] / V. Peshko, O. Chernousenko, T. Nikulenkova, A. Nikulenkov // Propulsion and Power Research – China: National Laboratory for Aeronautics and Astronautics, 2016 – Volume 5, Issue 4 – pp.

302–309.

3. Development of a technological approach to the control of turbine casings resource for supercritical steam parameters [Text] / O. Chernousenko, D. Rindyuk, V. Peshko, V. Goryazhenko // Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 2018 – Volume 2, Issue 1(92) – pp. 51–56.
4. Черноусенко, О. Ю. Вплив роботи енергоблоків ТЕС в маневреному режимі на вичерпання ресурсу енергетичного обладнання [Текст] / О. Ю. Черноусенко, В. А. Пешко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 6–16.

УДК 536.24:662.92

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ТОПОК И ТЕПЛООБМЕННИКОВ НОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Сорока Б. С., д.т.н., проф.; Згурский В. А., к.т.н.

Институт газа НАН Украины

Благодаря проведенным во всем мире исследованиям и разработкам изменились тенденции проектирования и конструкции трубчатых теплообменников, включая высокотемпературные рекуперативные утилизаторы теплоты. Смена трендов обусловлена стремлением интенсифицировать теплопередачу между потоками теплоносителей, повысить термическую стойкость и обеспечить компактность аппаратов, для чего обычно используются внутритрубные вставки-турбулизаторы разнообразных конструкций. В качестве вставок внутри труб и каналов в большинстве зарубежных исследований рассматриваются спиральные ленты (ТТ – twisted tapes), часто дополняемые геометрическими элементами, нарушающими плавное обтекание профилей.

Альтернативу упомянутым вставкам–турбулизаторам представляют вторичные излучатели–вставки внутри каналов и труб. При этом вторичные излучатели принимают на себя функции дополнительных поверхностей нагрева для “холодного” потока, являясь адиабатными телами, которые получают и переотражают падающие потоки излучения от теплообменных поверхностей между теплоносителями.

В нашей работе [1] рассматриваются результаты CFD моделирования различных схем трубчатого рекуперативного теплообменника,

обеспечивающего нагрев воздушного потока в трубах продуктами сгорания, движущимися в межтрубном пространстве теплообменника.

Вследствие диатермичности воздуха конвективная передача теплоты от стенок трубчатого теплообменного канала к внутритрубному потоку представляет единственный механизм переноса теплоты для стандартных аппаратов с полыми трубами, внутренний теплообмен уступает по интенсивности внешнему и является лимитирующим этапом теплопередачи от продуктов сгорания к потоку внутри труб. Установка вторичных излучателей внутри каналов позволяет устранить ограничения внутреннего теплообмена по тепловосприятию воздушного потока.

Схема теплообменника “продукты сгорания CP – нагреваемая среда ht ” с вертикальными трубами высотой 1 м представлена на рис. 1 с демонстрацией горизонтальных сечений аппарата. С использованием CFD моделирования изучено влияние установки внутритрубных (ISE) и межтрубных (ESE) вторичных излучателей.

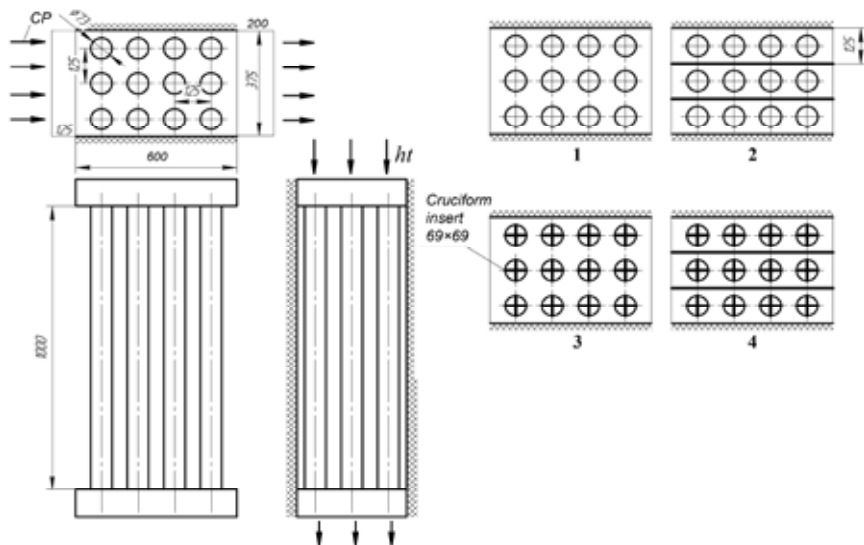


Рис. 1. Схема i -го теплообменника ($i=1, 2, 3, 4$) с использованием вторичных излучателей (горизонтальные сечения): 1 – базовая схема без вторичных излучателей SE; 2 – схема 1 + внешние SE (ESE); 3 – схема 1 + внутренние SE крестообразного сечения (ISE); 4 – схема 1 + ISE + ESE.

Рассматриваются 4 варианта схемных решений i : 1 – базовая схема без вторичных излучателей SE; 2 – схема 1 + внешние SE (ESE); 3 – схема 1 +

внутренние SE крестообразного сечения (ISE); 4 – схема 1 + ISE + ESE.

Размещение вставок вносит качественные изменения в возможности совершенствования высокотемпературных теплообменников благодаря устранению лимитирующего воздействия передачи теплоты со стороны “низкотемпературного” теплоносителя. Существенная роль внутритрубных вставок в повышении энергоэффективности теплообменника дополняется внешними межтрубными излучателями – перегородками. Отмечается влияние вставок и перегородок на термическую стойкость теплообменника благодаря воздействию излучения со стороны SE на величину и разброс температур стенок труб и каналов.

В настоящей работе для сопоставления схем $i = 1, 2, 3, 4$ выбраны случаи нагрева потоков воздуха (индекс “ $ht \equiv a$ ”) и пара (индекс “ $ht \equiv vv$ ”) при начальных температурах потоков ht соответственно $T_a = 300$ К (27 °С) и $T_{vv} = 373$ К (100 °С) с массовыми потоками $\dot{m}_a = 0,772$ кг/с, $\dot{m}_{vv} = 0,479$ кг/с, имеющими одинаковую располагаемую энергию (избыточную энтальпию нагреваемого массового потока на входе в каналы: $\Delta h_{a,en} = \Delta h_{vv,en}$).

На рис. 2 представлено изменение тепловосприятия потоков теплоносителя в трубах: воздуха (рис. 2, а) и пара (рис. 2, б) в зависимости от температуры продуктов сгорания на входе в теплообменник.

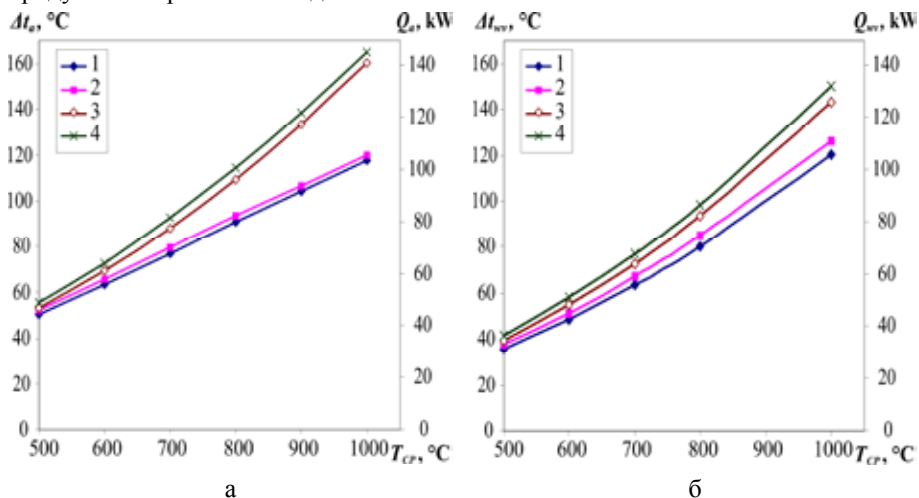


Рис. 2. Изменение подогрева теплоносителя $\Delta t, ^\circ\text{C}$, и переданного теплового потока Q, kW , в рекуперативной секции в зависимости от температур продуктов сгорания T_{cp} : а – воздух ($\Delta t_a, Q_a$), б – водяной пар ($\Delta t_{vv}, Q_{vv}$).

Отмечается существенное влияние наличия / отсутствия вторичных излучателей, размещения внутренних вставок и межтрубных листовых перегородок, которое оценивается относительным приростом теплового потока δQ_{ht} в сопоставлении с базовым (1-ым) вариантом схемы (без каких-либо вторичных излучателей).

В частности тепловосприятие теплообменных труб для любой из конструктивных схем i -го аппарата ($i = 1, 2, 3, 4$), а также эффективность схемы в целом оцениваются в сопоставлении с базовой конструкцией ($i=1$):

$$\delta Q_{ht} = \left(\frac{Q_{ht,i}}{Q_{ht,i=1}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

Если при $T_{CP} \leq 500^\circ\text{C}$ установка вторичных излучателей достаточно слабо сказывается на тепловосприятии нагреваемого газа (воздух, пар), то по мере дальнейшего повышения T_{CP} наблюдается качественное изменение зависимости $Q_{ht}(T_{CP})$. В диапазоне $500^\circ\text{C} < T_{CP} < 1000^\circ\text{C}$ характер функциональных связей существенно зависит от наличия и типа используемых вторичных излучателей. Наблюдается последовательное усиление теплопередачи при переходе от схемы i к схеме $i+1$, где $i \in \{1, \dots, 4\}$: умеренное – при установке внешних вторичных излучателей (перегородок между продольными рядами труб) и существенное – при размещении внутри труб вторичных излучателей различной геометрии (в рассматриваемом случае – вставок крестообразной формы).

Установлено, что даже при относительно невысоких температурах греющего теплоносителя $T_{CP} \approx 500^\circ\text{C}$ наличие вторичных излучателей ISE и ESE повышает результирующее тепловосприятие: на 4,3 – 10,7% абсолютной величины базового теплового потока $Q_{ht,i}$ ($i=1$, отсутствие вторичных излучателей) для случая нагрева воздуха и на 6,0 – 17,6% – при нагреве водяного пара (табл. 1).

Таблица 1. Относительное увеличение тепловосприятия труб теплообменника при нагреве воздуха $\delta Q_{a,i}$ и водяного пара в теплообменнике i -ой схемы по сравнению с вариантом 1 (расчет по результирующему тепловому потоку)

$T_{cp}, ^\circ\text{C}$	$\delta Q_i, \%$							
	воздух ($ht \equiv a$)				водяной пар ($ht \equiv wv$)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
500	–	4,3	5,6	10,7	–	6,0	11,13	17,56
600	–	4,0	9,5	15,0	–	5,9	13,05	19,20
700	–	3,7	14,7	20,3	–	5,8	14,9	21,2

800	–	3,0	20,7	26,2	–	5,6	16,8	22,7
900	–	2,5	28,1	32,8	–	5,3	18,1	23,8
1000	–	2,0	36,5	40,5	–	5,0	19,1	24,8

При $T_{CP} = 1000^\circ\text{C}$ изменение Q_{ht} при установке вторичных излучателей может достигать $\delta Q_{ht} = 2,0 - 40,5\%$ – для воздушного потока, $5,0 - 24,8\%$ – при нагреве пара.

В соответствии с усилением лучистой теплоотдачи при росте температуры греющего газа T_{CP} в теплообменнике возрастают тепловые потоки, рабочие температуры и результирующее тепловосприятие потока нагреваемого газа – воздуха (неравенства (2)) и пара (неравенства (3)) – соответственно:

$$\frac{\partial Q_{a,i}}{\partial T_{CP}} > 0; \quad \frac{\partial^2 Q_{a,i}}{\partial T_{CP}^2} > 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_{wv,i}}{\partial T_{CP}} > 0; \quad \frac{\partial^2 Q_{wv,i}}{\partial T_{CP}^2} > 0. \quad (3)$$

При рабочей схеме $i = 2$ с ростом T_{CP} ослабляется роль вторичного излучателя – межтрубной перегородки:

$$\frac{\partial(\delta Q_{ht,2})}{\partial T_{CP}} < 0, \quad (4)$$

где $ht \equiv a$; wv .

Для схем $i = 3$ и 4 относительное влияние T_{CP} при нагреве лучепрозрачного газа (воздуха) и излучающе–поглощающей среды (водяного пара) различное: прогрессивно нарастающее влияние – в 1-ом случае (нагрев воздуха) и постепенно ослабевающее – во 2-ом случае (нагрев пара). Это относится к обоим рассматриваемым газам (воздух, пар):

$$\frac{\partial(\delta Q_{ht,i})}{\partial T_{CP}} > 0; \quad \frac{\partial^2(\delta Q_{ht,i})}{\partial T_{CP}^2} > 0, \quad (5)$$

где $i = 3, 4$; $ht \equiv a$;

$$\frac{\partial(\delta Q_{ht,i})}{\partial T_{CP}} > 0; \quad \frac{\partial^2(\delta Q_{ht,i})}{\partial T_{CP}^2} < 0, \quad (6)$$

где $i = 3, 4$; $ht \equiv wv$.

Предложен способ комплексной оценки энергетической эффективности конструкции современных теплообменников с внутренними и внешними вторичными излучателями SE с учетом характеристик нагреваемого потока.

В качестве меры эффективности теплообменных аппаратов и топок Э

предлагается использовать отношение тепловых потоков: воспринятого трубами и располагаемой (избыточной) энтальпии потока греющего теплоносителя на входе в греющий канал (межтрубное пространство):

$$\Xi = \frac{100 \cdot Q_{н}}{\dot{m}_{CP} \Delta h_{CP, en}}, \% \quad (7)$$

На рис. 3 представлена зависимость Ξ от T_{CP} для всего массива параметров в диапазоне их числового варьирования. Из графика следует, что предложенные схемы позволяют существенно повысить возможности существующих аппаратов при нагреве любых практически распространенных теплоносителей: диатермических и излучающее-поглощающих сред.

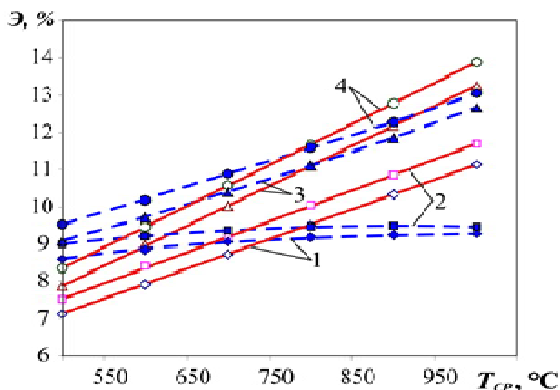


Рис. 3. Зависимость эффективности теплообменной секции от TCP. Нагреваемая среда: воздух (а) – пунктир, пар (wv) – сплошные линии. Конструктивная схема: 1 – базовая схема (без SE); 2 – схема 1 + ESE; 3 – схема 1 + ISE; 4 – схема 1 + ISE + ESE

Выводы

1. С использованием CFD-моделирования проведено численное сопоставление эффективности процессов переноса в трубчатых теплообменниках при установке внутритрубных и межтрубных вторичных излучателей для случаев нагрева лучепрозрачного газа (воздушного потока) и излучающего газа (водяного пара). Найдено, что эффективность предложенной схемы в обоих случаях возрастает с ростом температуры греющего потока продуктов сгорания.
2. Интенсификация теплообмена, понижение и выравнивание температур стенок теплоприемных поверхностей, обусловили пересмотр тенденций проектирования трубчатых высокотемпературных теплообменников с

принятием внутритрубных вторичных излучателей в качестве обязательного элемента конструкции аппаратов. Соответствующие конструкции целесообразны для использования в топках и утилизаторах теплоты различного назначения – от рекуператоров для подогрева компонентов горения (воздуха, низкотемпературных газов) до пароперегревателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Soroka B., Zgurskiy V. Comprehensive analysis of transfer processes in modern high-temperature heat exchangers// Теплофізика та теплоенергетика, 2019, т. 41, №3.

УДК 66.074

ВЛИЯНИЕ АЗОТА N₂ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА O₃ В РАЗРЯДНЫХ УСЛОВИЯХ

Дресвянников В. Г., к.ф.-м.н.

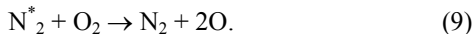
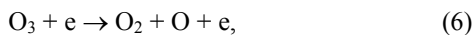
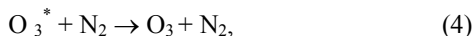
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

Работы, проводимые в отделе физики высокотемпературных процессов, связаны с изучением физико-химических процессов образования и связывания NO_x. Целью этих исследований является получение данных для создания моделей взаимодействия химической кинетики и газодинамики горения твердых топлив, указывающих пути снижения выбросов и повышения связывания оксидов азота.

В этом сообщении представлены результаты анализа влияния молекул N₂ на скорость генерации O₃ и его энергетический выход в условиях барьерного разряда. Процесс nO₂ → mO₃ является эндозергическим с затратами порядка 1,5 эВ на одну молекулу озона, что соответствует выходу 1,2 кг·кВтч⁻¹. При использовании тлеющего разряда энергетический выход составляет величину порядка 0,15 кг·кВтч⁻¹ при эффективности 12%. Эффективность промышленных установок гораздо ниже (~3 – 5%) и при требуемой производительности энерговыход не превышает 0,05 кг·кВтч⁻¹. В ряде случаев (за счет определенной конфигурации неоднородности барьерного разряда) плазмохимическое озонирование происходит с КПД ~30% и достигает выхода 0,4 кг·кВтч⁻¹ [1].

В качестве модели процессов генерации – распада O₃ в разрядных условиях выбран следующий набор реакций:





с соответствующими константами скоростей реакции k_i ($i = 1, 2, 3, \dots, 9$)

При заданных константах реакций (1) – (9) можно оценить влияние процентного содержания N_2 , как на равновесную концентрацию O_3 , так и на степень конверсии O_2 в O_3 на основе простого уравнения для скорости генерации озона:

$$\frac{\partial N_{\text{O}_3}}{\partial t} = K^+ (N_{\text{O}_2} - N_{\text{O}_3}) - K^- N_{\text{O}_3} \quad (10)$$

где: $K^+ = f_1(k_i, N_{\text{O}_2}, N_{\text{N}_2})$ и $K^- = f_2(k_i, N_{\text{O}_2}, N_{\text{N}_2})$ – эффективные константы скоростей процессов генерации и стока производимого озона. На основе анализа процессов (1) – (9), используя незначительные упрощения, зависимость соотношения скоростей этих процессов (K^+ / K^-) от процентного содержания азота N_2 можно представить в виде следующего графика (Рис. 1):

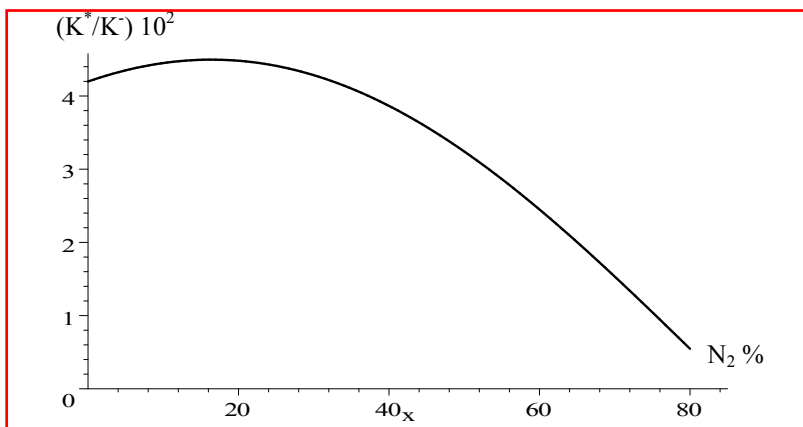
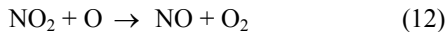
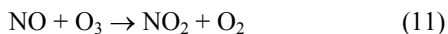


Рис. 1. Зависимость отношений эффективных скоростей генерации K^+ и распада озона K^- от процентного содержания азота N_2 в реагирующей смеси

Зависимость стационарной концентрации озона O_3 , образующегося за счет кинетики процессов (1) – (9), с учетом возникающего в системе азотного цикла



также демонстрирует немонотонный характер изменений в зависимости от процентного содержания N_2 в исходной смеси. Соответственно проявляется такая закономерность и в степени конверсии кислорода в озон (Рис. 2.) Основной эффект влияния азота на генерацию озона заключается в образовании возбужденных молекул N_2^* при взаимодействии с электронной компонентой газоразрядной смеси. Снятие этого возбуждения происходит, в том числе, и с образованием молекулярного кислорода O (реакция (9)), который и участвует в образовании O_3 .

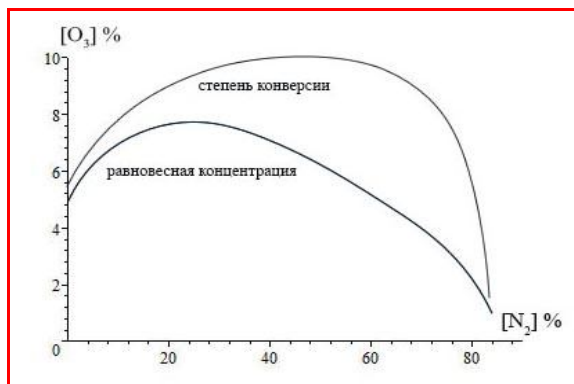


Рис. 2. Зависимость степени конверсии O_2 в O_3 и стационарной концентрации озона от процентного содержания азота N_2 в смеси

Отметим особенность генерацию озона в воздухе: как показано в ряде работ (например, в [2]), присутствие в смесях даже малых количеств примесей электроотрицательных газов резко увеличивает выход озона. Так добавка SF_6 в количестве менее 0,1% способно повысить в 2–3 раза выход озона на единицу заряда, прошедшего меж электродами. Учитывая, что большинство соединений NO_x имеют большие значения величины сродства к электрону, эту особенность следует учитывать при реализации промышленных технологий производства и применения O_3 . Возможно, что именно с этим эффектом связано значительное увеличение содержания озона в земной тропосфере, которое наблюдается в последние десятилетия [3]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Лунин В. В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона. МГУ.

Москва, 1998.

2. *Okazaki S., Niva H., Sugimitsu H. et al. // Proc. Intern. Symp. on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry. Czechoslovakia, 1996. P. 26.30.*
3. Laurence Y. Yeung, Lee T. Murray, Patricia Martinerie, Emmanuel Witrant, Huanting Hu, Asmita Banerjee, Anaïs Orsi, Jérôme Chappellaz. Isotopic constraint on the twentieth-century increase in tropospheric ozone // *Nature*. 2019. V. 570. PP. 224–227.

УДК 622.66:662.767.1

**ОСОБЛИВОСТІ МІКРОДИФУЗІЙНОГО СПАЛЮВАННЯ ГАЗУ
ЗА СТАБІЛІЗАТОРАМИ В ЗАБАЛАСТОВАНОМУ ОКИСЛЮВАЧІ**

Черноусенко О. Ю., д.т.н., проф.; Бутовський Л. С., к.т.н., доц.;

Грановська О. О., к.т.н., доц.; Мороз О. С., Старченко О. С.

**Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

В енергетиці та промисловості України існує багато виробництв, в яких основний технологічний процес супроводжується утворенням вихідних газів, які містять газообразні токсичні речовини. До таких підприємств відносяться деякі хімічні, нафтопереробні, металургійні, цементні тощо. З метою запобігання забруднення оточуючого середовища ці промислові викиди потребують нейтралізації. Одним з найбільш поширених методів знешкодження шкідливих речовин є їх допалювання в спеціальних установках – пальникових пристроях при проходженні через високотемпературні продукти згоряння, що утворюються при спалюванні висококалорійних газів [1].

Здебільшого газоподібні відходи промислових підприємств характеризуються зниженим вмістом кисню, що значно ускладнює робочий процес пальника, враховуючи, що необхідний вміст (за об'ємом) кисню у окислювачі повинен бути не менше: для газу – 15%, мазуту – 16%, вугілля – 17% [2].

Аналогічна ситуація має місце в теплоенергетичній галузі. Одною з характерних особливостей світової та української енергетики є підвищення нерівномірності енергоспоживання при збільшенні долі базових теплових та атомних електростанцій в структурі генеруючих потужностей, що призводить до погіршення умов регулювання потужності в енергосистемах. При цьому

гостро відчувається дефіцит маневрових установок, які здатні ефективно працювати в піковому і напівпіковому режимах.

Вважається, що на сучасному етапі розвитку енергетики вирішення поставлених проблем є можливим шляхом використання сучасних газотурбінних та парогазових установок різного типу [3]. В сучасних ГТУ робоча температура газів після камери згоряння на вході в газову турбіну наблизилась до 1500 °С, а температура вихідних газів – до 600 °С [3].

З метою підвищення ефективності газотурбінного циклу використовується допалювання палива в середовищі вихідних газів газотурбінної установки, наприклад, в схемі ПГУ з котлом-утилізатором [4].

Підвищення температури газів в камері згоряння призводить до зменшення вмісту кисню в продуктах згоряння [5]. При температурі газів понад 1100 °С необхідне байпасування близько 65% вихідних газів і підведення відповідної кількості зовнішньо-циклового повітря.

В той же час, організація процесу допалювання газів пов'язана з жорсткими вимогами до пального пристроїв камери допалювання, які повинні забезпечити високу ступінь повноти згоряння палива, стабільне горіння при високих швидкостях газового потоку після ГТУ, надійне запалювання вторинного палива [4].

Результати аналізу характеристик існуючих пального пристроїв показують, що в значній мірі вказаним вимогам можуть відповідати мікрофакельні дифузійно-стабілізаторні пального пристрої, які являють собою систему кутових або плоских погано-обтічних тіл – стабілізаторів, що оббігаються повітряним потоком. Паливо на горіння подається дискретними струменями з отворів, які розміщені вздовж висоти стабілізатора [4].

Стабілізаторні пального пристрої в установках допалювання палива використовуються в зарубіжних ПГУ, при розробці блоків допалювальних пристроїв (БДП), для підігріву продуктів згоряння за газовою турбіною ГТ-25-700 перед сітьовими підігрівачами на Якутській ГРЕС, для котла-утилізатора ПГУ-800 [6].

Метою роботи було визначення характеристик сталої роботи дифузійно-стабілізаторних пального пристроїв в умовах зменшення кількості кисню в окислювачі, а також розробка заходів підвищення ефективності при мінімальній подачі додаткового повітря в паливник. Відповідні дослідження були проведені на стенді, який складався з камери первинного підігріву повітря з температурою газів на виході $t_{г.вих}^{1ст} = 50 - 850$ °С, охолоджувальної секції, де

продукти згоряння охолоджувались до $t_{г.вх}^{2ст} = 50 - 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнт надлишку повітря в дослідному пальниковому пристрої визначається за формулою

$$\alpha^{2ст} = G_{п} / L_{н} \cdot G_{г}^{2ст} \quad (1)$$

де $G_{п}$, $G_{г}^{2ст}$ – витрата повітря через дослідну ділянку і газу в пальниковому пристрої, кг/с, $L_{н}$ – стехіометричний коефіцієнт з урахуванням баластного газу в повітрі після камери первинного підігріву, кг/кг.

Доля баластних газів в окислювачі після камери підігріву повітря розраховується за формулою

$$g_6 = (1 + L_0) / (1 + \alpha^{1ст} \cdot L_0) \quad (2)$$

де $\alpha^{1ст}$ – коефіцієнт надлишку повітря в камері підігріву повітря. На підставі аналізу отриманих експериментальних даних запропоновано формулу розрахунку характеристик сталості факелу на багатій межі з урахуванням баластування газів продуктами згоряння у вигляді

$$\alpha_{\min}^I = 1,44 \frac{W_{к}^{0,3}}{B_{ст}^{0,5}} \frac{e^{1,5k_f}}{k_f^{1,5}} \left(\frac{T_{в}}{273} \right)^{-0,6} \left(4,08 \cdot 10^{-3} \frac{F_{ст}}{\sum f_{г}} + 0,84 \right) \cdot (1 + g_6)^m \quad (3)$$

де показник ступеню m також залежить від ступеню баластування потоку

$$m = 7,2 \cdot (1 + g_6) - 6,2 \quad (4)$$

Проведені дослідження показали, що розширити діапазон сталості і ефективної роботи пальника при зменшенні вмісту кисню в окислювачі можливо за рахунок організованого підведення додаткового кисню (чистого повітря) в корінь факелу в зоні рециркуляції. Це дозволяє організувати стале горіння факелу, причому зі збільшенням витрати додаткового повітря мінімальне значення коефіцієнту надлишку повітря на багатій межі зменшується, що дає можливість організувати сталу роботу пальника в межах $(\alpha_{2ст}^{\min}) \leq 4,0$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Спейшер В. А. Огневое обезвреживание промышленных выбросов. – М.: Энергия, 1979. – 262 с.
2. РТМ 108.020-22-48. Установки парогазовые стационарные. Методика расчета тепловых схем установок и высоконапорных парогенераторов. Л.: НПО ЦКТИ, 1985.
3. В. А. Христинич, Г. Б. Варламов. Газотурбинные установки: история и перспективы // Киев: НТУУ «КПИ», 2006. – 384 с.
4. Цанев С. В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых

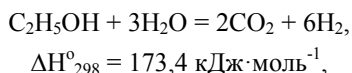
- електростанцій / С. В. Цанев, В. Д. Буров, А. Н. Ремезов // Под ред. С. В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 584с.
5. Горбаненко А. Д. Горелочное устройство для котла-утилизатора ПГУ-800/ А. Д. Горбаненко, О. В. Морозов, А. Г. Тумановский, А. А. Абросимов, А. П. Романов // Теплоэнергетика, 1989, №5. – с. 54–58.

УДК 544.47:544.344

**РОЗРОБЛЕННЯ АВТОНОМНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВІ
ПОРТАТИВНОГО КАТАЛІТИЧНОГО РЕАКТОРА КОНВЕРСІЇ
БІОЕТАНОЛУ ТА ВОДНЕВОЇ ПАЛИВНОЇ КОМІРКИ**

**Трипольський А. І., к.х.н.; Долгіх Л. Ю., к.х.н.; Пятницький Ю. І., д.х.н.;
Столярчук І. Л.; Старая Л. О.; Стрижак П. Є., д.х.н., чл.-кор. НАНУ
Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України**

Водень і паливні комірки розглядаються як нові потенційні технології, що забезпечують можливість переходу в довгостроковій перспективі до екологічно чистих енергетичних і транспортних систем. У цьому контексті отримання водню конверсією біоетанолу, що одержується з відновлюваної сировини (енергетичних рослин, агропромислових відходів, залишків переробки деревини, органічної частини твердих побутових відходів), є привабливим способом перетворення воденьвмісної сировини в газоподібний водень. Каталітичний паровий риформінг етанолу (ПРЕ), який здійснюється за реакцією:



дозволяє отримати 6 молей водню на 1 моль етанолу; при цьому 50% водню вилучають із води, що є важливою перевагою застосування даного процесу у виробництві водню. На практиці процес ПРЕ протікає з утворенням ряду побічних продуктів, що вимагає включення в технологічну схему систем очищення цільового продукту і підвищує вимоги до каталізаторів. Тому проводяться широкі дослідження в напрямку вдосконалення каталітичних систем і оптимізації умов проведення процесу ПРЕ. Актуальним завданням є розробка компактних пристроїв для отримання водню, в тому числі паливних процесорів, призначених для систем автономного енергозабезпечення.

Термодинамічний аналіз показує, що при використанні сумішей з

мольному співвідношенні $C_2H_5OH: H_2O = 1:19$ максимальний рівноважний вихід водню досягає 95,3% при 600 °С (рис. 1), в разі застосування суміші $C_2H_5OH: H_2O = 1:3$ (що відповідає стехіометрії реакції ПРЕ) – не перевищує 74,7% при 800 °С. У сирому біоетанолі співвідношення $C_2H_5OH: H_2O$ становить 1:13÷1:30, що має істотне значення з точки зору можливості безпосереднього використання в паровому риформінгу продукту ферментації відновлюваної рослинної сировини.

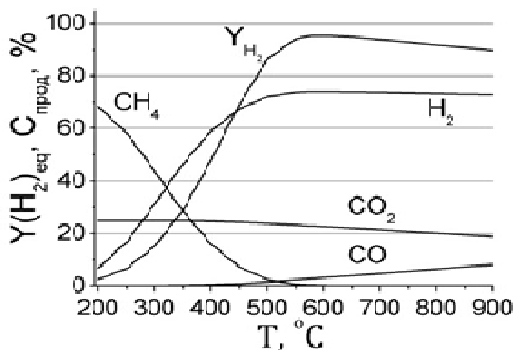


Рис. 1. Рівноважні концентрації продуктів ($C_{\text{прод.}}$) і виходу водню ($Y(H_2)_{\text{eq}}$) в процесі ПРЕ водно-спиртових сумішей з мольним співвідношенням $C_2H_5OH: H_2O = 1:19$.

Парову конверсію етанолу здійснюють з використанням благородних та перехідних металів на носіях. Недоліками таких каталізаторів є їх висока ціна, спікання частинок металу, утворення побічних продуктів (метан, окис вуглецю, етилен), закоксування поверхні, що знижує вихід водню і стабільність каталізаторів.

Нами розроблено нові каталізатори – ферити $M^II Fe^III_2O_4$ ($M = Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn$) зі структурою шпінелі, які не містять благородних металів. Показано, що ферити Mg, Mn і Fe здатні забезпечити повне перетворення етанолу (як модельної сполуки класу спиртів в складі кисневмісних сполук біосировини) при температурах 550 – 650 °С, співвідношенні $H_2O/C_2H_5OH = 19$ і об'ємної швидкості подачі реакційної суміші 4000 – 5000 год⁻¹ (2,7 мол.% C_2H_5OH , 50 мол.% H_2O , решта – N_2). Максимальний вихід водню $Y(H_2) = 94,6\%$ досягнуто при 650 °С на $MnFe_2O_4$, отриманому сольвотермальним методом ($MnFe_2O_4$ (t)). Другий за величиною вихід H_2 (84,3%) при 100% перетворення етанолу був досягнутий при 550 °С на $MnFe_2O_4$, отриманому

методом співосадження (MnFe_2O_4 (с)) (рис. 2).

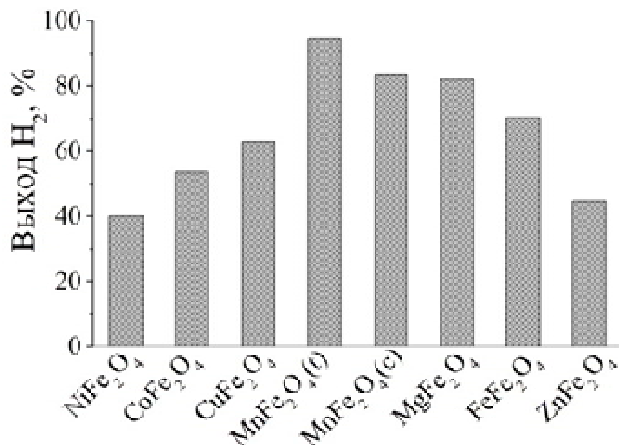


Рис. 2. Вихід водню, досягнутий в процесі ПРЕ на феритах металів

Встановлено, що оксидна фаза феритів в умовах парового риформінгу етанолу зберігається для MnFe_2O_4 , MgFe_2O_4 , FeFe_2O_4 і ZnFe_2O_4 (спостерігається лише збільшення розмірів кристалітів). У тих же умовах NiFe_2O_4 , CoFe_2O_4 і CuFe_2O_4 повністю або частково відновлюються до металів і демонструють більш низький вихід H_2 .

Утворення монооксиду вуглецю, вкрай небажаної домішки в водні, не спостерігалось до температури 500°C . При підвищених температурах CO зафіксовано на NiFe_2O_4 ($550 - 700^\circ\text{C}$), CoFe_2O_4 ($600 - 700^\circ\text{C}$) і MnFe_2O_4 (700°C). Необхідно відзначити також, що ферити Mg , Mn , Fe , Cu і Zn відносно мало активні в реакції водяного зсуву, в іншому випадку спостерігалось б поява CO за рахунок оборотної реакції $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ (згідно термодинамічних розрахунків рівноважний вміст CO в продуктах реакції ПРЕ стає помітним вище 400°C).

Проведена технічна оцінка можливості отримання водню шляхом парового риформінгу біоетанолу для роботи паливного елемента з метою отримання електроенергії. Для роботи автономного каталітичного генератора водню необхідні додаткові витрати енергії на нагрів реакційної зони, що може бути здійснено різними методами з використанням біоетанолу в якості палива. Виконано розрахунок енергетичного балансу автономного каталітичного генератора водню на основі розробленого нами каталізатора для парового

риформінгу етанолу при атмосферному тиску і температурі 600 °С. Показано, що, якщо взяти всі енергетичні витрати на генерування водню рівними 100% (60% – нагрів реакційної суміші і 40% – здійснення реакції парового риформінгу), можна отримати близько 55% у вигляді електроенергії в паливному елементі. 30% витраченої теплової енергії можна компенсувати за рахунок охолодження продуктів риформінгу (H_2 і CO_2).

УДК 620.9:662.71:662.63:544.478

НОВІ ПАРОГАЗОВІ ТА ГІБРИДНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Дудник О. М., к.т.н.

Інститут вугільних енерготехнологій (ІВЕ) НАН України

Розроблення та впровадження нових енергетичних установок в Україні повинно відповідати вимогам європейських директив стосовно граничних значень допустимих викидів забруднюючих речовин для енергоустановок різної потужності, а також Паризькій кліматичній угоді для скорочення викидів парникових газів. Найбільш екологічно чистими та енергоефективними на даний час є парогазові установки, подальший розвиток яких пов'язаний зі застосуванням електрохімічних генераторів (ЕХГ) на паливних елементах.

В роботі [1] показано, що в Україні парогазові технології широко не використовуються у виробництві. Встановлена електрична потужність кожної парогазової установки в Україні становить від 20 до 150 МВт. Ці ПГУ працюють на газі. На даний час в Україні не існує ПГУ з внутрішньоцикловою газифікацією твердого та рідинного видів палива.

В Японії, КНР, республіці Корея, Індії, Австралії вугілля та ін. тверде паливо розглядаються як основне паливо для розвитку економік цих країн. В рамках виконання третього етапу проекту Osaki CoolGen (OSG, Японія) на вугільній парогазовій установці з внутрішньоцикловою газифікацією (ПГУ з ВГВ) заплановано показати можливість досягнення електричного ККД на рівні 47,0% з 90% зв'язуванням вуглекислого газу для енергоблоків електричною потужністю 500 МВт [2]. Високий електричний ККД вугільного енергоблоку зі зв'язуванням CO_2 заплановано одержати завдяки використанню ПГУ з внутрішньоцикловою газифікацією вугілля зі застосуванням ЕХГ на паливних елементах. В Японії з метою покриття електричної потужності енергоблоків

АЕС Фукусима в рамках проекту відновлення розпочато будівництво двох ПГУ Фукусима з ВГВ електричною потужністю 543 МВт кожний. Пуск енергоблоків заплановано в 2020 та 2021 роках [3].

У світі продовжується випробування та впровадження новітніх високоефективних енергетичних установок, в яких використовується гібрид двох енерготехнологій: прямого перетворення енергії палив в ЕХГ на високотемпературних паливних елементах (ЕХГ на ВПЕ) з допаленням одержаних газів в каталітичній камері згорання та використанням теплової енергії продуктів згорання під тиском в газотурбінних енергоустановках (ГТУ). Теплова енергія продуктів згорання після ГТУ використовується для підігрівання повітря та газів в рекуперативних теплообмінниках перед ЕХГ ВПЕ, опалення та гарячого водопостачання [4, 5]. Електричний ККД гібридних енергетичних установок залежить від виду вихідного палива, потужності енергетичних установок й становить від 40 до 65%. Високий електричний ККД досягається завдяки прямому перетворенню хімічної енергії палива в електричну енергію в ЕХГ на ВПЕ та одержання електроенергії в ГТУ. Коефіцієнт надлишку повітря для роботи гібридних енергоустановок становить від 3,0 до 5,0 [6].

В університеті Кюсю (Японія) випробувано нову гібридну установку ЕХГ на трубчатих твердооксидних ВПЕ з мікро-ГТУ загальною електричною потужністю 250 кВт компанії Мітсубісі Хітачі Пауе Системс Лтд. Енергоустановка займає площу 40 м². Під час роботи енергетичної установки на міському газі її електричний ККД в перерахунку на вищу теплоту згорання палива становив 55% [7]. Проекти ЕХГ на ВПЕ з мікро-ГТУ компанії Мітсубісі Хітачі Пауе Системс Лтд реалізуються на заводі Мотомачі корпорації Тойота Мотор, заводі Комакі корпорації НЖК Спарк Плаг, станції Сенджу Техно компанії Токио Газ та в технологічному центрі корпорації Тайсей [8].

Співробітники Брандербургського технологічного університету (Німеччина) оцінили можливості нових підходів щодо удосконалення системи ЕХГ з паровим риформінгом газів на анодах планарних ВПЕ та з використанням мікро-ГТУ [9].

В ІВЕ НАН України виконано оцінювання можливості використання наявної мікро-ГТУ для створення гібридної установки ЕХГ-ГТУ з використанням розробленої в ІВЕ НАНУ конструкції газифікатора-трансформера для конверсії твердих органічних відходів в синтез-газ. Електрична потужність мікро-ГТУ в разі використання продуктів згорання

синтез-газу після ЕХГ становить 40 кВт, частота обертів газової турбіни 38000 об/хв., частота обертів електрогенератора (після редуктора) 8000 об/хв., тиск продуктів згоряння перед газовою турбіною 5,5 бар. Газифікатор-трансформер випробувано на різних видах твердого палива та органічних відходах з використанням та без використання каталізаторів і парового та повітряного плазмотронів за атмосферного тиску. Для роботи газифікатора в складі ЕХГ з мікро-ГТУ необхідно буде змінити розміри газифікатора, збільшити тиск в газифікаторі до 6 бар, збільшити продуктивність газифікатора та застосувати системи шлюзування для подачі твердого органічного матеріалу та виводу золи. Розроблено та розраховано принципову схему нової гібридної енергетичної установки з газифікатором-трансформером. За розрахунковими даними в разі використання в якості палива відходів деревини вологістю 25%: витрата відходів деревини в газифікатор становить 150 кг/год, електрична потужність гібридної енергоустановки 250 кВт за електричного ККД 43%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Патон Б., Долінський А., Халатов А., Білека Б., Костенко Д., Письменний О. Перспективи розвитку вітчизняної парогазової технології. Вісник НАН України. 2009. № 4. С. 3–10.
2. Beginning the World's First Integrating Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle Project (IGFC) Demonstration Project – Aiming to both Improve Efficiency of Coal-Fired Power Generation and Greatly Cut CO₂ emissions. News Release, NEDO, OSAKI CoolGen Corporation. April 17, 2019. 4 p.
3. Wakabayashi Y. The Latest Coal-Fired Thermal Power Plant. Mitsubishi Hitachi Power Systems. 2017. 38 p.
4. Дудник А. Н., Корчевой Ю. П., Майстренко А. Ю. Гибридные энергетические установки на топливных элементах. Энергетика: Экономика, технология, экология. 2000. №3. С. 33–36.
5. Dudnik O. M., Sokolovska I. S. Conversion of Ukrainian Low Grade Solid Fuels with CO₂ Capture. Coal-Energy, Environment and Sustainable Development. Proceeding of Twenty-Seventh Annual International Pittsburgh Coal Conference, 2010. Paper 22-2. 22 p.
6. Dudnik O. M., Sokolovska I. S. Results of Organic Fuel Conversion at Fuel Cell Test Installation. Fuel Cell technologies: State and Perspectives, NATO Sci.Ser., II, Math., Phys., and Chem., Netherlands: Springer. 2005. Vol. 202. P. 163–174. DOI: [10.1007/1-4020-3498-9_15](https://doi.org/10.1007/1-4020-3498-9_15)

7. Ando O., Oozawa H., Mihara M., Irie H., Urashita Y., Irthami T. Demonstration of SOFC-Micro Gas Turbine (MGT) Hybrid Systems for Commercialization. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2015. Vol. 52. No. 4. P. 43–52.
8. Irie H., Miyamoto K., Teramoto Y., Nagai T., Endo R., Urashita Y. Efforts toward Introduction of SOFC-MGT Hybrid System to the Market. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2017. Vol. 54. No. 3. P.
9. Berg H. P., Kleissl M., Himmelberg A., Lehmann M., Prechavut N., Vorpahl M. Heat balancing of direct reforming fuel cells in MGT-SOFC hybrid systems IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 501 012007. 2019. DOI:10.1088/1757-899X/501/1/012007

УДК 665.66

**ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ УТИЛІЗАЦІЇ ТПВ
ЯК ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕСУРСУ В УКРАЇНІ**

Карп І. М., академік НАН України; П'яних К. Є., д. т. н.

Інститут газу НАН України

Проблема утилізації твердих побутових відходів в Україні потребує негайного рішення. Вона набула надзвичайної гостроти та створює соціальну напругу в суспільстві.

Аналіз матеріалів щодо енергетичного використання ТПВ приводить до висновку, що єдиного рішення щодо технології утилізації ТПВ для кожного міста або регіону не існує. Необхідно на основі вивчення міжнародного досвіду винайти і запропонувати найкращі технологічні рішення енергетичної утилізації ТПВ, придатні для умов України, вивчити можливість їх застосування з урахуванням економічного стану держави та існуючого законодавства, розробити і спрямувати відповідні рекомендації керівним органам.

Технологію використання відходів для кожного міста або регіону слід обирати з урахуванням їх кількості, складу, теплотворної спроможності, транспортних витрат. Принципово важливим питанням є визначення потужностей енергетичних установок утилізації відходів, вирішити переваги будівництва одиничних підприємств великої потужності чи розбити процес утилізації на ряд відносно невеликих потужностей з урахуванням транспортних витрат та наявності територій для їх розміщення. Необхідно вирішити питання про цілеспрямованість енергетичного використання – на отримання переважно

електричної або теплової енергії або іншого виду палива: біогазу, біометану, іншого газоподібного – генераторного або синтез-газу, рідкого у вигляді важкого котельно-пічного палива або твердого у вигляді пелет RDF (Refuse Derived Fuel).

В Україні утворюється 250–300 кг ТПВ на людину в рік, що складає 9–11 млн т в рік. З них 2,7% спалюється, трохи більше 3% переробляється, а близько 94% спрямовується на полігони та сміттєзвалища. Значна частина попадає на стихійні звалища, яких щороку утворюється близько 27 тисяч. Виходячи з даних про усереднений склад відходів, та враховуючи досвід Швеції, можна оцінити частку відходів, придатних до енергетичного використання у 50%. По аналогії в Україні можна було би використати в якості первинного палива приблизно 4,5 млн т ТПВ, що відповідає 1,28 млн т умовного палива (теплотворна спроможність ТПВ прийнята 2000 ккал/кг або 8,36 МДж/кг), або в еквіваленті 1,5 млрд м³ природного газу. Використання відсортованих харчових відходів в суміші з відходами сільського господарства або спеціально вирощеними рослинами для виробництва біогазу або біометану може збільшити цю величину у рази. Як приклад, в Німеччині у енергетичних цілях виробляється і використовується 8,3 млрд м³ біометану, а встановлена потужність генерації становить 4 ГВт. Технології виробництва біогазу з харчових відходів з наступним виробництвом з нього електричної енергії та продажу її за «зеленим» тарифом та виробництво біометану є інвестиційно привабливими. У транспортній енергетиці набуває поширення використання біометану як моторного палива для транспортних засобів, отриманого з відходів. Розроблені і виконуються програми його широкомасштабного використання поряд з природним газом у стиснутому та зрідженому стані. У їх виконанні беруть участь енергетичні та автовиробничі компанії – Gasum, Iveco, Capstone, Volkswagen.

Слід відзначити доцільність використання біогазових комплексів як балансуючих потужностей енергомереж.

Газифікація і піроліз відходів потребують їх спеціальної підготовки – ретельного сортування, подрібнення, гомогенізації, створення систем видалення смоли та інших включень з генераторного газу та пірогазу. Ці технології не набули широкого застосування. При виготовленні з відходів RDF додаються операції грануляції, торефікації, подрібнення, що приводить до подорожання процесу.

Серед технологій енергетичного використання ТПВ найбільшого

поширення у світі набула технологія їх спалювання з виробництвом електричної і теплової енергії. Кількість ССЗ у Європі зростає. У 2016 році загальна їх кількість становила 520 одиниць порівняно з 390 у 2010 році. Середня потужність заводів становить від 100–115 тис. тонн на рік у Польщі та Франції до 215–230 тис. т/рік у Німеччині та Великобританії.

Для України можна вважати найбільш прийнятною просту, надійну та випробувану технологію спалювання ТПВ з відсортуванням лише харчових відходів, виробництвом з них біометану для використання як моторного палива, спалюванням решти органічної маси у котлах з рухомим подом, випробуваною відносно не дорогою системою очищення вихідних газів. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року, прийнята у 2017 році, передбачає будівництво до 2030 року 19-ти ССЗ: двох на першому етапі (2017 – 2018 роки), 12 заводів протягом 2019 – 2023 та ще п'яти у 2024 – 2030 роках [1]. Стратегія в цілому консервує технічну відсталість України у справі поводження з відходами, не говорячи вже про невиконання завдання першого етапу; вона передбачає енергетичне використання на кінцевому етапі лише 10% відходів та захоронення великої їх частки – 30%. Таки показники не відповідають світовим тенденціям. Прийнятий у 2019 році Національний план управління відходами до 2030 року не передбачає відповідальних виконавців, а головне – джерел та обсягів фінансування заходів.

Типова питома вартість впровадження технологій очищення продуктів спалення ТПВ, на рівні 250 тис. доларів США на 1 МВт встановленої потужності.

Вартість будівництва заводу з термічної переробки відходів визначається його потужністю, глибиною переробки, тощо, а також глибиною очищення викидів у довкілля. Усереднена питома вартість будівництва знаходиться на рівні 450 тис. Євро на 1 т ТПВ.

Міжнародний досвід свідчить про участь відомих енергетичних компаній у виробництві біогазу та будівництві сміттєспалювальних заводів. В Україні вирішення таких проблемам могло би зацікавити НАК «Нафтогаз України», ДПЕК, Енергоатом, місцеві адміністрації та територіальні громади.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Національна стратегія управління відходами до 2030 року». Розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р.

УДК 620.9:662.71:662.63:544.478

**АВТОНОМНА КОГЕНЕРАЦІЙНА ЕНЕРГОУСТАНОВКА
З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ПАЛИВ
ТА ВОДНЮ**

Дудник О. М., к.т.н.; Соколовська І. С., к.т.н.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

Основною відмінністю конструкції нової енергоустановки Інституту вугільних енерготехнологій НАН України (ІВЕ НАНУ) від традиційних піролізних котлів є розділення установки на два агрегати: газифікатор (з сушінням, піролізом та газифікацією твердого палива) та котел (що працює на одержаному газі чи вихідному твердому паливі). Це дозволяє використовувати одержаний в газифікаторі-трансформері (ГТР) газ не тільки для опалення, а й після очищення газу для вироблення електроенергії в електрогенераторах з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) чи в електрохімічних генераторах на паливних елементах (ЕХГ на ПЕ). Газифікатор, в залежності від поставлених завдань, може бути трансформований в різні модифікації газифікатора зі щільним шаром (з висхідним та низхідним потоками одержаного газу) чи киплячим шаром (бульбашковим чи циркулюючим киплячим шаром). Крім того, для конверсії високовологих та небезпечних твердих органічних відходів в газифікаторі використовуються плазмотрон (паровий чи повітряний). Після газифікатора використовується каталітичний реактор для очищення газу від смол. Когенераційна установка розроблялась з метою одержання теплової та електричної енергії для приміщень площею до 100 м² (для опалення та одержання електроенергії в лабораторії досліджень паливних елементів ІВЕ НАНУ). Електрична потужність когенераційної установки в разі використання газифікатора з оберненої газифікації відходів деревини та електрогенератора з ДВЗ становить 2 кВт, тепла потужність установки на опалення 10 кВт [1, 2].

Важливим питанням роботи когенераційної установки є забезпечення потреб споживачів енергією впродовж доби (робота в маневреному режимі) та сезонних навантажень. З урахуванням потреб в електричній енергії на рівні 150 кВт·год встановлено, що в разі встановлення електрогенератора з ДВЗ електричною потужністю 2 кВт для збільшення часу його ефективної роботи немає необхідності неперервної його роботи як по вимогам експлуатації, так і потреб в електроенергії. На установці заплановано встановлення шістьох акумуляторів (для легкових автомобілів) ємністю 0,72 кВт·год кожний

(60 А·год, 12 В) з перетворювачем постійного току в змінний. В такому разі добове навантаження електрогенератора з ДВЗ становить 2,5 год. (за коефіцієнту використання електричної потужності 10,4%), а акумуляторів – 21,5 год. Спочатку заряджаються акумулятори, а потім вони періодично підзаряджаються електрогенератором з ДВЗ. В такому разі час роботи електрогенератора за рік становить 911 год., а час роботи до капітального ремонту двигуна 2 роки. На даний час в світі ще не розроблено малі комерційні системи з електричними акумуляторами для збереження електроенергії влітку та використання одержаної енергії для опалення взимку. Але є позитивні результати з акумулювання енергії завдяки виробництву водню в теплий сезон року та його використанню в холодну пору року.

В світі виробництво водню для забезпечення електроенергією та теплом досліджується на енергетичних установках, які працюють як автономно, так і для центральних мереж постачання енергії. Важливим питанням для ефективного вирішення проблеми добових та сезонних навантажень для опалення та гарячого водопостачання є існування розвинутої інфраструктури теплопостачання (центрального опалення) та газових мереж. В разі недостатності природного газу в транспортній інфраструктурі його постачання, в світі розглядаються декілька сценаріїв використання існуючих централізованих систем без їхнього змінення: збільшення виробництва природного газу; додаткове завантаження системи біо-природним газом з біогазових заводів; додавання в природний газ водню (до 10 об.% в Німеччині); додавання метану, одержаного завдяки каталітичній конверсії водню та вуглекислого газу (який одержується під час використання викопних палив) [3]. Існуюча система постачання природного газу може бути поступово змінена зі збільшенням вмісту водню в суміші газів, що надходить користувачам [4]. Розвиток існуючої водневої інфраструктури є пріоритетним напрямом розвитку економік країн ЄС, Японії, США та КНР. На даний час в Європі загальна протяжність водневих трубопроводів становить 1600 км, а виробництво чистого водню 90 млрд м³/рік. Сьогодні в світі для забезпечення автотранспорту воднем працює 369 автозаправних станцій: в Європі – 152, в Азії – 136, в Америці – 80, Австралії – 1 [3].

В ІВЕ НАНУ проведено цикл досліджень з одержання водню з вугілля та біомаси [6–8]. Проведено розрахунки системи спалювання водню з використанням когенераційної установки для одержання тепла в разі теплової потужності котла на опалення 10 кВт з метою визначення необхідної витрати

водню, який потрібно буде накопичити в теплу пору року для спалювання з використанням повітря в опалювальний сезон. В результаті одержано такі показники роботи: термічний ККД котла – 94,8%; витрата водню – 3,5 нм³/год.; витрата повітря – 8,4 нм³/год.; склад продуктів згоряння, об. %: Н₂О – 34,7, N₂ – 65,3; вихід води – 2,8 кг/год.; витрата водню за опалювальний сезон (3600 год. роботи за постійного теплового навантаження котла на опалення 10 кВт) – 1,1 т.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Дудник О. М., Соколовська І. С. Розроблення процесів конверсії твердих органічних відходів в збагачений воднем синтез-газ для відновлювано-водневої енергетики та паливно-комірчаних енергетичних установок. Фундаментальні аспекти відновлювано-водневої енергетики і паливно-комірчаних технологій / за загальною редакцією Ю. М. Солоніна. Київ: «КІМ», 2018. С. 46–56. URL: http://www.materials.kiev.ua/Hydrogen/Book_printVer.pdf
2. Dudnyk O. M., Sokolovska I. S. Solid organic waste and coal gasification for operation of electric generators. Proceedings of 14th International Science and Practice Conference “Coal Heat Power Industry: Ways of Reconstruction and Development”, October 9-10, 2018. Kyiv: Coal Energy Technology Institute of NAS of Ukraine. 2018. P. 18–20. URL: <http://www.ceti-nasu.org/upload/iblock/22f/22f649993fee6a325048218b9de4a64c.pdf>
3. The role of hydrogen and fuel cells in providing affordable, secure low-carbon heat. White paper. A H₂FC Supergen. The hydrogen and fuel cell research hub. Ed. Paul Dodds and Adam Hawkes. London: Imperial College. 2014. 186 p. URL: <http://www.h2fcsupergen.com/wp-content/uploads/2014/05/H2FC-SUPERGEN-White-Paper-on-Heat-May-2014.pdf>
4. Дудник А. Н., Мелак В. Г. Водородные автозаправочные станции. Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. № 4. – С. 3–12.
5. Hydrogen/Fuel Cells. Hydrogen Refuelling Stations Worldwide. URL: <https://www.netinform.net/h2/h2stations/h2stations.aspx?Continent=NA&StationID=-1>
6. Dudnik O. M., Sokolovska I. S. Conversion of Ukrainian Low Grade Solid Fuels with CO₂ Capture. Coal-Energy, Environment and Sustainable Development. Proceeding of Twenty-Seventh Annual International Pittsburgh Coal Conference, 2010. Paper 22-2. 22 p.
7. Дудник О. М., Соколовська І. С. Дослідження процесів отримання водню з

- українських енергетичних кам'яних та бурих видів вугілля. Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях /за заг. ред. академіків НАНУ В.В. Скорохода та Ю.М. Солоніна. К.: «КІМ», 2015. С. 91-97.
8. Дудник О. М., Трипольський А. І., Стрижак П.Е., Калішин Є. Ю., Соколовська І. С. Отримання водню гетерогенно-каталітичною конверсією твердих органічних відходів. Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях / за заг. ред. академіків НАНУ В. В. Скорохода та Ю. М. Солоніна. К.: «КІМ», 2015. С. 24-32. URL: <http://www.materials.kiev.ua/Hydrogen/mono2.pdf>

УДК 620.9

ПЕРСПЕКТИВИ ВУГІЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СПІВТОВАРИСТВІ

Дунаєвська Н. І., к.т.н.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

Енергетика України, що натепер в своєму розвитку повинна враховувати не тільки вітчизняні нормативно-правові акти (такі як Енергетична стратегія України до 2035 року), але й прийняті країною зобов'язання як члена Європейського енергетичного співтовариства та підписанта Паризької угоди останніми роками приділяє значну увагу будівництву електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії, чому в значній мірі сприяє прийнята урядом України тарифна політика щодо «зеленої» енергетики. При цьому теплова енергетика, що забезпечує 29% виробництва електроенергії в країні, а під час пікових навантажень є взагалі безальтернативною, багатьма вітчизняними «експертами» позиціонується як безперспективна для подальшого розвитку. При цьому наводяться приклади скорочення такого виробітку в європейських країнах (Велика Британія, Данія, Норвегія, Німеччина).

Загальновідомі прийняті Європейським Співтовариством амбітні зобов'язання значно скоротити до 2050 року виробіток електричної енергії на викопному паливі, а особливо при факельному спалюванні вугілля як найбільшого з відомих енергетичних технологій забруднювача навколишнього природного середовища.

Бурхливе впровадження вітрових, сонячних та гідроелектростанцій дійсно

значно підвищило відсоток «зеленої» енергетики в енергетичному балансі ЄС 28 (23,8%), але і на сьогодні на ТЕС Європи на вугіллі виробляється 20% електроенергії. Безумовною перевагою «зеленої» енергетики є відсутність викидів парникових газів, але їх емісія від спалювання вугілля і так за останні 25 років (1990–2015 рр.) скоротилася в Європейському Союзі від 5,2 до 2,1% від усіх світових викидів CO₂.

Мета повністю декарбонізувати економіку ЄС, з чистою нульовою емісією вуглецю до 2050 року є дуже амбітною і може бути досягнута лише за умови чіткого визнання ризиків, та якщо необхідні для такого зниження технології готові до впровадження, і якщо різні стартові позиції країн-членів та їх регіонів будуть прийняті до розрахунку.

Кліматична політика ЄС зосереджується на парниковому газі CO₂. Однак глобальна концентрація метану в атмосфері – набагато потужнішого парникового газу, ніж CO₂ – зросла в світі в 2014, 2015, 2016 та 2017 роках темпами, які не спостерігалися з 1980-х років. За висновками неурядових «зелених» організацій зростання концентрації атмосферного метану викликається вірогідно сланцевим газом та нафтою в Північній Америці як основним джерелом неорганізованих викидів метану в виробництві, зрідженні, морському транспорті та регазифікації скрапленого природного газу. Вищезазначене повністю суперечить жорстким вимогам до зменшення викидів парникових газів, що наголошується в ЄС, і ЄС має визначатись з реальністю та витратами на реалізацію своїх планів з урахуванням глобального рівня.

У підсумку можна зазначити, що кліматична та енергетична політика ЄС не є ринковою, недискримінаційною та технологічно нейтральною.

Вклад вугілля в європейську енергетику сьогодні:

- Вугільний сектор ЄС зменшив викиди CO₂ на понад 47% з 1990 року, тим самим сприяючи досягненню цілей у Паризькій угоді Рамочної конвенції ООН по зміні клімату. Жоден інший сектор не зробив так багато.
- Видобуток і використання вугілля пов'язані з понад 200 000 високоякісних, добре оплачуваних робочих місць, а також непрямими робочими місцями.
- Вугілля сприяє доступним та конкурентоспроможним цінам на електроенергію, зміцнюючи ЄС як місце для ведення бізнесу.

Перспективні напрямки на наступний період:

Вугілля може бути партнером для виробництва електроенергії з відновлюваних джерел енергії: існуючі вугільні електростанції гнучко реагують на підйоми та спади вітрової та сонячної енергії.

Мета розвитку вугільної енергетики ЄС на майбутнє в умовах тиску пріоритетних планів розвитку цього сектору економіки з використанням відновлюваних джерел є створення та впровадження технологій спалювання вугілля з нульовими викидами вуглецю. Вугільний сектор вже працює над новими варіантами зберігання енергії та новими процесами, які дозволять переробляти вуглець, а не викидати в атмосферу. Ці процеси можуть виробляти чистий водень і боротися зі зростаючою горою пластикових відходів: насправді будь-який матеріал на основі вуглецю, включаючи деревну біомасу, може бути перетворений на корисні нові продукти в умовах безвуглецевої економіки.

УДК 662.93

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКІВ ГОРІННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА У ПРОГРАМІ ANSYS FLUENT

Нехамін М. М., к.т.н.; Бондик Д. Л., к.т.н

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

Розрахунок вигорання твердих частинок є однією з найскладніших задач при моделюванні роботи паливних котлоагрегатів. Цією задачею займаються вже довгий час в усьому світі. Моделі, які описують вигорання твердих частинок теж різняться, навіть якщо вони використовують схожі дифузійно-кінетичні підходи і одну реакцію вуглецю частинки палива з киснем повітря з утворенням диоксиду вуглецю.

При цьому параметрами кінетичної складової швидкості реакції зазвичай виступають енергія активації E (кДж/моль) та передекспоненційний множник рівняння Ареніуса (зазвичай позначається як A або k_0 , розмірність може бути різною).

У програмі ANSYS Fluent використовується кінетично-дифузійна модель Баума-Стріта, яка визначає швидкість горіння частинки вугілля

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p \frac{\rho R T_0 Y_{Ox}}{\mu} \frac{1}{\frac{1}{D_0} + \mathfrak{K}}$$

де \mathfrak{K} [с/м] – кінетична швидкість $\mathfrak{K} = C_2 e^{-(E/RT_0)}$, D_0 [с/м] – коефіцієнт швидкості дифузії $D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_0)/2]^{0.75}}{d_p}$, а C_1 та C_2 – кінетичні параметри, які задаються. C_2 і E є параметрами того вугілля, яке розраховується.

У вітчизняній літературі швидкість горіння частинки вугілля визначається схожим чином, але в формулу входять інші параметри

$$\frac{dm_p}{dt} = -\frac{\beta A_p C_0}{\frac{1}{\alpha_K} + \frac{1}{\alpha_D}}, \text{ де } \alpha_K = k_0 e^{-E/RT_0}, \alpha_D = \frac{Nu_D D}{d_p}$$

Результати кінетичних досліджень вітчизняних палив публікуються у вигляді пари k_0 та E , які напряму використати в розрахунках в пакеті Fluent неможливо. Тому для визначення параметрів C_1 та C_2 був прийнятий такий підхід, за яким енергія активації приймалася однаковою, а кінетичні і дифузійні складові двох рівнянь прирівнювалися окремо. Складність виникає в тому, що в рівняння C_1 входить різниця температур частинки і газу, яка є змінним параметром. Вплив її на кореляцію розрахунків по Хзмалян та Бауму-Стрїту можна побачити на рис. 1.

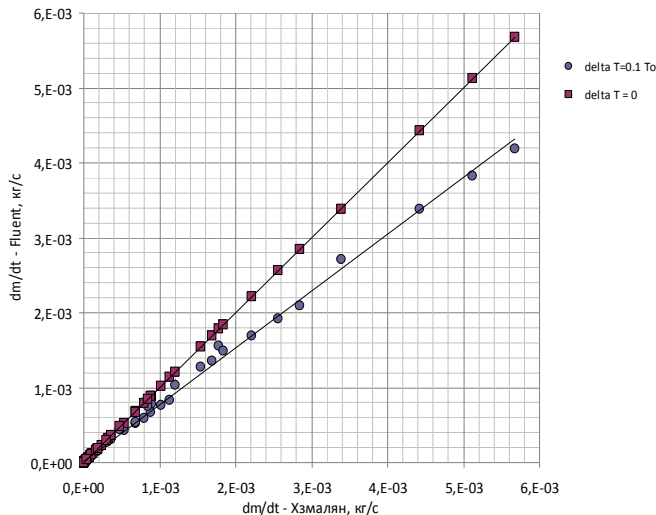


Рис. 1. Зіставлення швидкостей горіння частинок вугільного коксу по різних моделях при температурі частинок, що перевищує температуру газової фази на 10% і при їхній рівності

Окрім постійних параметрів, практично незмінних у топці котла, в розрахунки входить також змінна величина – температура газової фази T_0 . Аби обійти ці труднощі, ми вводимо постійну в розрахунковій області температуру, яку можна назвати визначальною $T_{\text{виз}}$, для використання при обчисленні C_1 та C_2 замість T_0 . Проведені розрахунки показали, що отримане значення $T_{\text{виз}} = 2000 \text{ K}$ досить універсально (рис. 2).

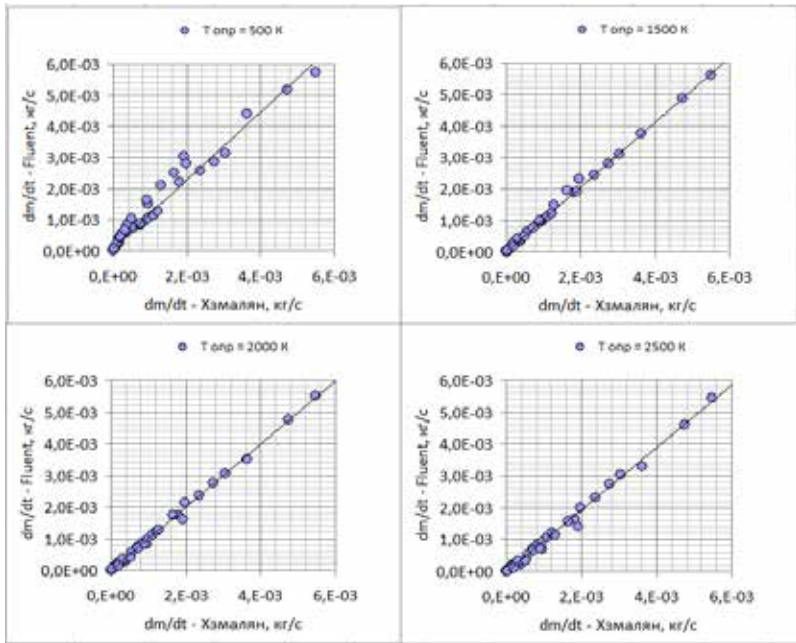


Рис. 2. Зіставлення швидкостей горіння частинок вугільного коксу по різних моделях при температурі частинок, що перевищує температуру газової фази на 10% для різних значень визначальної температури

В даній роботі був показаний один з можливих шляхів використання літературних даних по швидкості горіння твердих палив у пакеті ANSYS Fluent, які попередньо були отримані з використанням інших (не застосовуваних у Fluent) моделей опису горіння.

УДК 519.6:536.423

**АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛООБМЕННИКАХ
С ВТОРИЧНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ
(ПО ДАННЫМ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ)**

¹Сорока Б. С., д.т.н., проф.; ²Dr. Sandor P.; ¹Кудрявцев В. С., к.т.н.;

¹Згурский В. А., к.т.н.; ¹Воробьев Н. В., к.т.н.

1 – Институт газа НАН Украины, Украина

2 – Optimum Energo-Ecology Ltd, Dunaujvaros, Hungary (Венгрия)

В развитие работ по интенсификации высокотемпературного теплообмена

путем использования вторичных (промежуточных) излучателей в Институте газа предложен способ интенсификации тепловых процессов в топках с внутриканальными (внутритрубными) вставками в теплообменниках. Другое направление применения способа – создание внешних вторичных излучателей и размещение их между продольными рядами труб.

1. Физические основы совершенствования конструкций теплообменников. В соответствии с положениями фундаментальной теории теплопередачи и научными основами теплообменных аппаратов для интенсификации тепловых процессов необходимо форсировать теплоотдачу со стороны теплоносителя с меньшим коэффициентом теплоотдачи к теплообменной поверхности. Интенсификация теплообмена со стороны потока с большей теплоотдачей слабо сказывается на результирующем тепловом потоке. Эти положения прекрасно подтверждаются численным анализом с использованием CFD моделирования, проведенным для условий трубчатых систем в топке или теплообменнике, снабженных различными излучателями внутри труб и межтрубными пластинами – излучателями.

Способ интенсификации тепловых процессов в теплообменнике, снабженном одновременно внутренними и внешними вторичными излучателями, впервые предложен и изучен нами, а соответствующее устройство запатентовано как рекуперативный утилизатор теплоты продуктов сгорания [1].

Наряду с изложенным следует иметь в виду ряд обстоятельств, возникающих в промышленных условиях или при физическом (огневом) моделировании системы, которые не всегда учитываются при математическом или CFD моделировании. К их числу следует отнести неоднородность гидродинамических и тепловых характеристик потоков теплоносителей в сечениях теплообменных каналов, неоднородность и несимметричность полей падающих тепловых потоков, а также работу при нестационарных (переходных) режимах.

С учетом накопленных знаний, опыта и результатов предшествующих исследований впервые в мире изучены возможности совместного воздействия внутренних и внешних вторичных излучателей на теплосъем в теплообменных и топочных устройствах.

2. Испытания новых конструкций теплообменников на огневом стенде. Экспериментальные исследования такого способа совершенствования трубчатых теплообменных устройств проведены на автоматизированном

крупномасштабном огневом стенде, снабженном двумя параллельно работающими трубчатыми секциями, каждая из которых состоит из трех последовательно размещенных трубных петель.

Стенд компьютеризирован на основе специально созданных в Институте газа оригинальных программных продуктов, связанных с расчетами отдельных оперативных и теплообменных параметров, их накоплением и визуализацией изображений, а также систем автоматического управления работой огневого стенда с привлечением программного комплекса EZ Data Logger, обеспечивающего сбор, обработку и регистрацию текущей информации. Для выполнения перечисленных функций система использует упомянутые программные средства и аппаратные модули серии I-700 компании ICP DAS (Тайвань).

Текущее тепловосприятие секций рассчитывается по возрастанию энтальпии Δh_a воздушного потока V_a при повышении температуры от входа в секции $T_{a,en}$ до выхода $T_{a,ex}$ в процессе нагрева:

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a \Delta h_a = \int \rho_a(T_a) \Delta h_a (T_{a,ex} - T_{a,en}) d\dot{V}_a. \quad (1)$$

Система автоматического поддержания потоков воздуха в теплообменных секциях обеспечивала поддержание равных между собой расходов воздушного потока в секциях в каждый момент измерений. При сопоставлении результатов испытаний, одинаковые условия нагрева контролировались показаниями сводовых термодатчиков.

Проведен ряд серий опытов: часть экспериментов выполнена при отсутствии в камере вторичных излучателей, часть при размещении 1, 2 или 3 листовых перегородок, подвешенных со свода. Анализируемые ниже данные получены при размещении в камере только внешних вторичных излучателей *ESE*, в отдельных опытах, не рассматриваемых в работе трубные секции были оснащены внутренними вставками *ISE*.

Конструктивные особенности стенда при испытаниях:

- Наличие и тип внутренних вторичных излучателей *ISE* (варианты):
 - *ISE-0/BD* – отсутствие внутренних вставок;
 - *ISE-1*/ спиральная вставка *SP1*, относительный шаг спирали $\sigma = 4,0$;
 - *ISE-2*/ спиральная вставка *SP2*, относительный шаг спирали $\sigma = 2,5$;
 - *ISE-3*/ вторичный излучатель *MD3*-крестовидные радиальные ребра;
- Наличие и количество межтрубных листовых излучателей (варианты):
 - *ESE-0*/ – отсутствие листовых перегородок;

- ESE-1/1 перегородка;
- ESE-2/2 перегородки;
- ESE-3/3 перегородки.

Режимные характеристики стенда при испытаниях:

- расход газа V_{NG} , м³/ч;
- температура под сводом стенда T_{fl} , °С.

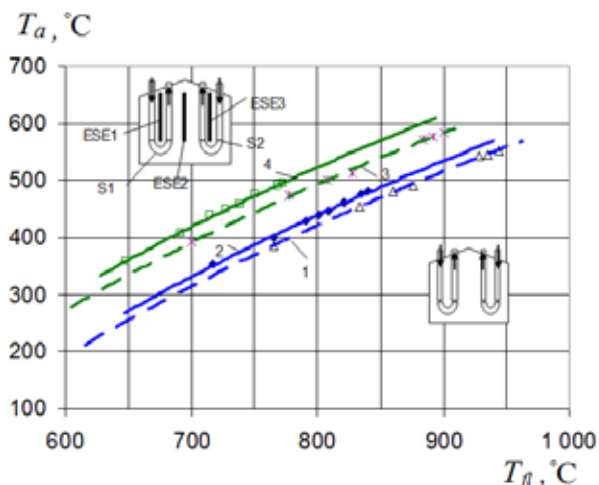


Рис. 1. Зависимость температуры подогрева воздуха в рекуператоре (на входе)

$T_{a,ex}$ от температуры продуктов сгорания T_{fl} под сводом топочной камеры /

Влияние перегородок – внешних вторичных излучателей.

1, Δ ; 2, \blacklozenge – секция S1; 3, $*$; 4, \square – секция S2.

Сплошные линии – установка трех перегородок ESE1, ESE2, ESE3; расход природного газа на стенд $V_{NG} = 23 - 24$ м³/ч (кривые 2; 4).

Пунктирные линии – отсутствие перегородок – внешних вторичных излучателей ESE; расход природного газа на стенд $V_{NG} = 37 - 38$ м³/ч. Трубы в секциях полые, отсутствие перегородок – внешних вторичных излучателей ESE-0. Размещение перегородок ESE представлено на поле рисунка.

3. Обсуждение результатов. На рис. 1 и 2 представлены соответственно зависимости температуры нагрева воздуха в секциях $T_{a,ex}$ и тепловосприятия секций Q_a . При варьировании температуры в топочной камере T_{fl} . Представленные зависимости построены в предположении о квазистационарном характере температурных полей в камере и рекуперативных

секциях в каждый момент времени, отраженный на рисунках. Динамика изменения тепловых характеристик секций обобщена кривыми 1–4, которые близки к линейным зависимостям, найденным при CFD моделировании соответствующих систем [2].

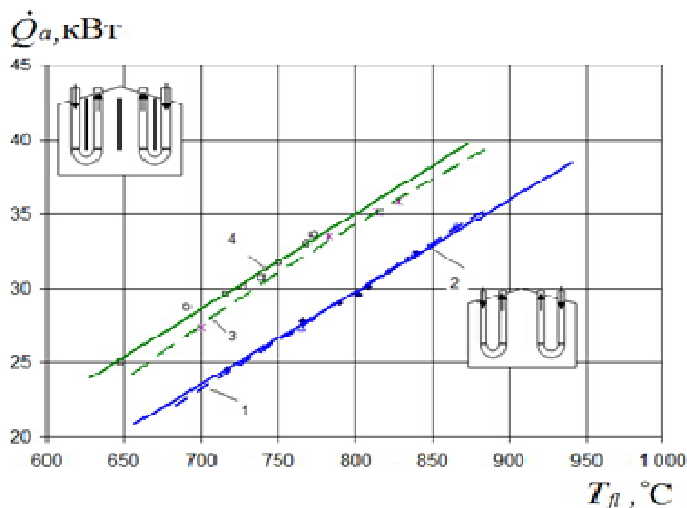
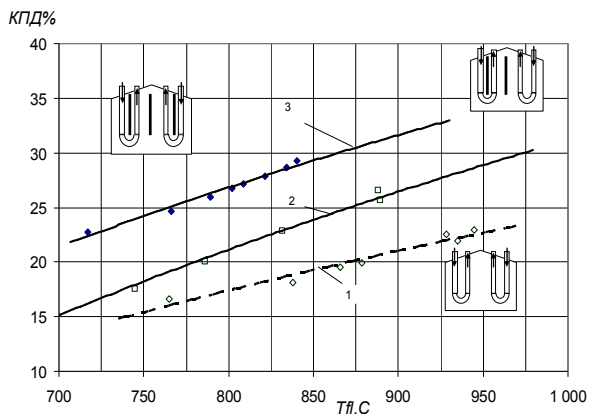


Рис. 2. Зависимость тепловосприятия секций \dot{Q}_a от температуры продуктов сгорания T_p под сводом топочной камеры. Обозначения – см. рис. 1.

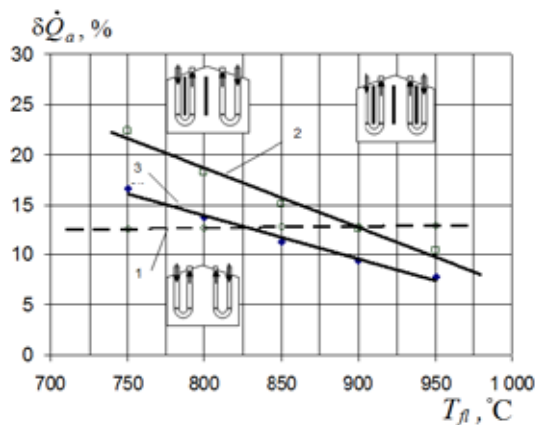
Из представленных на рис. 1 и рис. 2 зависимостей следует вывод о существенных преимуществах топочной камеры в случае размещения *ESE* между трубами: при близких в сравниваемых случаях температурных распределениях и результирующих тепловых потоках, усвоенных воздушным теплоносителем. В случае установки трех параллельных перегородок – вторичных излучателей *ESE*, а также обеспечения близких температур в камере под сводом T_p удастся весьма существенно сократить потребный расход топлива V_{NG} на стенд по сравнению со схемой, где отсутствуют *ESE*. при сохранении подогрева воздуха в контрольных секциях T_a , а также близости результирующего теплового потока \dot{Q}_a в сравниваемых вариантах. Расход природного газа V_{NG} сокращается с 37 $\text{м}^3/\text{час}$ до 23 – 24 $\text{м}^3/\text{ч}$ (установка *ESE*).

Обработка результатов сравниваемых испытаний по энергетической эффективности (КПД η_f в зависимости от T_p) – подтверждает возможность повышения η_f при установке перегородок – внешних тепловых излучателей (рис. 3, а). Наличие двух перегородок (*ESE-2*) эффективнее случая их

отсутствия (*ESE-0*), а размещение трех перегородок (*ESE-3*) дополнительно повышает КПД камеры. В опытах полезное тепловосприятие учитывалось по суммарному тепловому потоку, переданному обоим контрольным трубным сечениям.



а)



б)

Рис. 3. Зависимость КПД топочной камеры η_f (а) и неравномерность теплового потока δQ_a (б) для рекуперативных секций от температуры в камере T_{fl} .

1, \diamond – отсутствие перегородок, *ESE-0*; 2, \square – *ESE-2*/ 2 наружные перегородки; 3, \blacklozenge – *ESE-3*/ 3 наружные перегородки. Внутренние вставки отсутствуют (*ISE-0*).

Другим преимуществом оснащения теплообменной (топочной) камеры внешними вторичными излучателями является повышение равномерности

тепловосприятости в камере отдельных трубных секций (рис. 3, б), причем при установке внешних перегородок *ESE* между трубами роль этого эффекта с увеличением T_{fl} возрастает. При размещении трех вертикальных перегородок *ESE* степень неравномерности тепловосприятости рекуперативных секций сокращается по сравнению со случаем установки двух *ESE*. В свою очередь при полном отсутствии *ESE* в камере в области повышенных температур $T_{fl} \geq 900$ °С степень неравномерности обычно δQ_a еще выше, чем при наличии двух *ESE*. Степень неравномерности тепловосприятости секций:

$$\delta Q_a = \left(\frac{Q_{a,S1}}{Q_{a,S2}} - 1 \right) \cdot 100\% . \quad (2)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сорока Б. С. Воробйов М. В. Патент України на винахід №117864 «Рекуперативний утилізатор теплоти» / Бюлетень «Промислове власність», Бюл. №19., 2018.
2. Soroka B., Zgurskyi V. Comprehensive analysis of transfer processes in modern high-temperature heat exchangers// Теплофізика та теплоенергетика, 2019, т.41, №3.

УДК 66.074.2

ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕТРА И УЛАВЛИВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАХ

Вольчин И. А., д.т.н.; Рашепкин В. А., к.т.н.

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, г. Киев

Требования к эффективности улавливания дисперсных частиц выбрасываемых промышленными установками ужесточаются настолько, что актуальность приобретает рассмотрение действия всех возможных физических механизмов, влияющих на ее повышение или снижение.

Среди прочих механизмов, влияющих на эффективность работы электростатических фильтров, следует рассматривать и роль электрического ветра. Электрический ветер (ЭВ), как физическое явление, возникает в слабоионизированном газе в результате того, что заряженные частицы ускоряются электрическим полем и вследствие частых столкновений передают импульс нейтральным молекулам. Действующая на нейтральные молекулы в единице объема электрогидродинамическая сила $F_{i,c \rightarrow n}$ может быть

аппроксимирована формулой

$$F_{i;e \rightarrow n} \approx e (n_i - n_e) E = j_i / \mu_i - j_e / \mu_e, \quad (1)$$

где: e – элементарный заряд, Кл; n_i (n_e) – счетная концентрация, m^{-3} ; j_i (j_e) – плотность тока ионов (электронов), A/m^2 ; μ_i (μ_e) – подвижность ионов (электронов), $m^2/(B \cdot c)$; E – напряженность электрического поля, В/м. Под действием силы (1) в газе возникает поток (затопленная струя), направленный в электростатических фильтрах (ЭСФ) от коронирующих электродов к осадительным. При этом макроскопическое движение газа может оказывать сложное влияние на движение взвешенных в нем частиц.

Запыленный поток реальных промышленных отходящих газов содержит частицы с широким спектром размеров, которые в сильных электрических полях в присутствии электрического ветра движутся по-разному. Наиболее мелкие, наименее инерционные, субмикронные частицы и, вообще, частицы класса $PM_{2,5}$, в центральной части межэлектродного пространства могут быть захвачены возникающими в этой области вихрями. К тому же, такие частицы несут небольшой электрический заряд и медленнее мигрируют к осадительному электроду под действием электрического поля. Более крупные частицы несут больший заряд, но в присутствии электрического ветра их направленное движение к осадительным электродам может заметно искажаться, а осаждение таких частиц – приобретать вероятностный характер.

Для изучения движения частиц различных размеров под действием электрического ветра было проведено математическое моделирование, в котором по известным экспериментальным данным для условий разряда в ЭСФ была аппроксимирована зависимость скорости V электрического ветра от расстояния между коронирующим и осадительным электродом. В такой постановке задачи предполагалось, что скорость основного потока газа v_0 равна нулю, и частицы пыли двигаются со скоростью V_p только под действием гидродинамических сил вторичного потока, вызванного электрическим ветром. Частицы пыли считались незаряженными для того, чтобы проследить исключительно механическое влияние электрического ветра на движение частиц. Начальная скорость частиц и их расстояние от коронирующего электрода считались равными нулю. Данные результатов расчета для частиц пыли различного диаметра d_p приведены на рисунке 1.

Из рисунка видно, что мелкие, низко инерционные частицы класса PM_{10} , находящиеся в непосредственной близости к коронирующему электроду быстро приобретают скорость электрического ветра (Рис. 1а, 1б) и с такой же

скоростью движутся в сторону осадительных электродов. Скорость более инерционных частиц, диаметром порядка 35 мкм, сначала достигает скорости электрического ветра, некоторое время несколько превосходит ее, и на расстояниях порядка межэлектродного промежутка (Рис. 1в) сравнивается со скоростью ЭВ. Еще более тяжелые частицы сначала быстро разгоняются, а затем превышают скорость ветра (Рис. 1г), однако их скорость при этом остается относительно невысокой, по сравнению со скоростью ЭВ у коронирующих электродов.

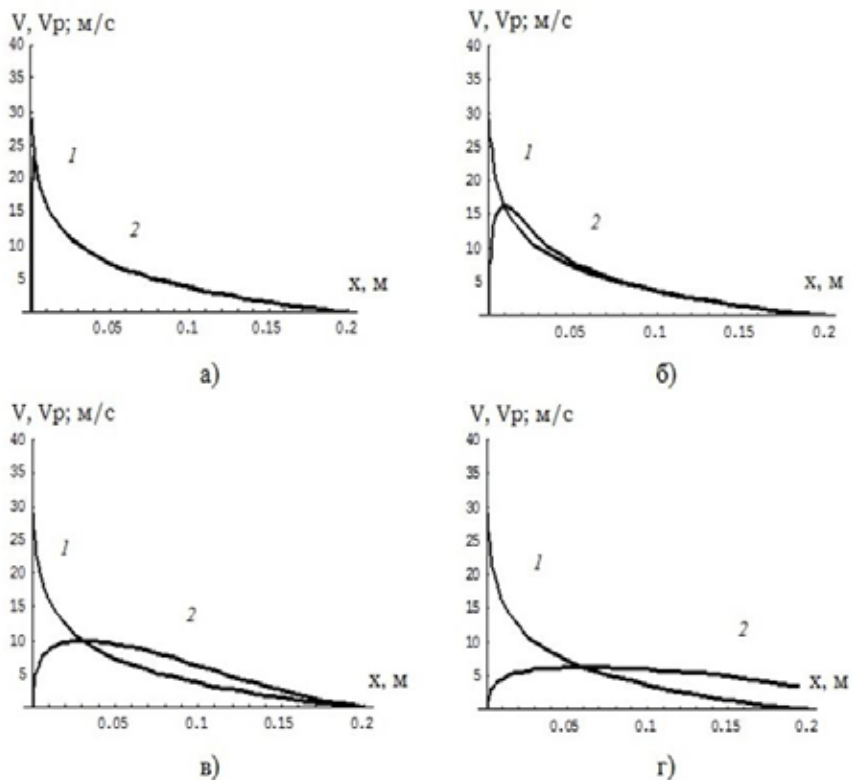


Рис. 1. Соотношение скоростей электрического ветра и частиц пыли различного размера вдоль межэлектродного промежутка: а) – $d_p = 2,5$ мкм; б) – $d_p = 10$ мкм; в) – $d_p = 35$ мкм; г) – $d_p = 90$ мкм. 1 – скорость электрического ветра V ; 2 – скорость частицы V_p ; x – расстояние от коронирующего электрода.

Расчеты также показали, что мелкие частицы PM_{10} , находящиеся в начальный момент времени на удалении от коронирующего электрода, за счет

малости скорости индукции также быстро приобретают скорость вторичного потока газа под действием электрического ветра, однако величина этой скорости на удалении от коронирующего электрода очевидно меньше скорости ветра вблизи электрода. Скорость удаленных от электрода в первоначальный момент более крупных, инерционных частиц при также малой скорости индукции быстро достигает скорости электрического ветра, и даже в несколько раз превышает ее по мере приближения к осадительному электроду, оставаясь, однако, по-прежнему малой по сравнению со скоростью V вблизи электрода. Следовательно, гидродинамическое воздействие электрического ветра в большей степени способствует направленному движению к осадительным электродам ЭСФ крупных, нежели мелких частиц.

Решение приведенной модельной задачи позволяет оценить исключительно механическое влияние электрического ветра на движение частиц пыли различного диаметра. При этом считалось, что зарядка частиц пыли в поле коронного разряда отсутствует. В реальных электростатических фильтрах зарядка частиц имеет определяющее влияние на скорость осаждения и эффективность улавливания взвешенных частиц. Крупные частицы, несущие большой заряд, в поле кулоновских сил и без помощи воздействия электрического ветра эффективно улавливаются в электрофильтрах. Поэтому в методических указаниях по проектированию электростатических фильтров действие электрического ветра не принимается во внимание.

Выполнение все более жестких требований к улавливанию взвешенных в очищаемых газах частиц возможно лишь за счет улавливания все более мелких фракций пыли. Электрический ветер оказывает влияние на характер динамического распределения частиц в межэлектродном пространстве электростатических фильтров, негативное проявление которого главным образом может оказаться связанным с возможностью возникновения вихрей в скрещенных полях скоростей основного газового потока и электрического ветра, и при этом – с захватом и удерживанием этими вихрями мелких частиц пыли, что препятствует их направленному движению к осадительным электродам ЭСФ. Некоторое повышение скорости основного потока очищаемых газов может предотвратить возникновение вихрей, связанных с влиянием электрического ветра. При этом скорость основного потока отходящих газов при заданной напряженности электрического поля в электрофильтре не должна быть слишком низкой, чтобы избежать формирования вихрей в результате воздействия электрического ветра на течение в газе, и не очень

высокой, чтобы не вызвать сильную турбулизацию основного потока газа. Поэтому величина оптимальной скорости основного потока газа в ЭСФ обычно находится в заданных пределах порядка 0,8 – 1,2 м/с, определенных накопленным опытом пуско-наладочных работ.

УДК 621.311

**АЛГОРИТМ ОЦІНКИ ОЧІКУВАНОВОГО ВИКИДУ ЗАБРУДНЮЮЧОЇ
РЕЧОВИНИ ПРИ СПАЛЮВАННІ ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА НА ТЕС
В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД КІЛЬКОСТІ ВИРОБЛЕНОЇ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЧИ ТЕПЛОТИ**

Вольчин І. А., д. т. н.; Гапонич Л. С., к. т. н.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

Ухвалення урядом України Національного плану скорочення викидів забруднюючих речовин від великих спалювальних установок [1,2] ставить перед операторами вимогу не перевищувати граничні значення валових викидів забруднюючих речовин в цілому по країні за кожен рік дії плану – з 2018 до 2028 року для діоксиду сірки та пилу і з 2018 до 2033 року для оксидів азоту. Тому актуальною є задача оцінки очікуваного викиду забруднюючої речовини (діоксиду сірки, пилу та оксидів азоту) в залежності від кількості виробленої (відпущеної) електроенергії (МВт·год) чи виробленого тепла (Гкал) за кожен рік роботи спалювальної установки у складі енергоблоку чи котельні.

В останні роки на українських ТЕС споживається 25–30 млн т вугілля. В паливному балансі ТЕС частка вугілля переважає: у 2017 році вона склала 98,2%, газу – 1,5%, а мазуту – 0,3%. Нами розроблено алгоритм оцінки очікуваного викиду забруднюючої речовини, що утворюється при спалюванні вугілля на ТЕС.

Щорічний валовий викид забруднюючої речовини E , т, визначається добутком її середньої концентрації c , мг/м³, та об'єму сухих димових газів V_{DFG} , м³/рік, приведеного до нормальних умов (температура 0 °С і тиск 101,35 кПа) та стандартного вмісту в них кисню (для твердого палива – 6%):

$$E = 10^{-9} \times c \times V_{DFG}. \quad (1)$$

Кількість сухих димових газів визначаються кількістю спаленого палива G , т, та питомим виходом сухих димових газів v_{DFG} , м³/кг:

$$V_{DFG} = 10^3 \times G \times v_{DFG}. \quad (2)$$

Питомий вихід сухих димових газів визначається вмістом у паливі вуглецю C , водню H , сірки S , кисню O , азоту N , золи A та вологи W [3–5]. Ці параметри елементного складу вказуються в сертифікатах на паливо, що видаються окремими сертифікованими лабораторіями з використанням обладнання, яке відсутнє в хімічних лабораторіях теплових електростанцій (ТЕС).

В [3–4] було запропоновано розглянути кореляцію між нижчої теплою згоряння на робочий стан палива Q_i^r , МДж/кг, яка визначається на ТЕС при проведенні технічного аналізу, та питомим виходом сухих димових газів v_{DFG} . На основі аналізу більше 100 сертифікатів на українське вугілля були розраховані значення v_{DFG} , які можна зв'язати з теплою згоряння палива Q_i^r емпіричною лінійною залежністю:

$$v_{DFG} = k \times Q_i^r, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, м³/МДж.

Було запропоновано різні коефіцієнти k для вугілля газової групи (Г, ДГ) – 0,357 та антрациту і пісного вугілля (А, П) – 0,368 [3–5]. Значення коефіцієнта k для вугілля антрацитової групи вище через низький вміст у ньому водню, при спалюванні якого утворюється водяна пара, яка не входить в сухі димові гази.

При наявності втрат теплоти через механічним недопал палива q_4 , %, формула (3) приймає вигляд:

$$v_{DFG} = k \times Q_i^r \times \varepsilon_C = k_1 \times Q_i^r, \quad (4)$$

де ε_C – ступінь окислення вуглецю палива,

k_1 – модифікований коефіцієнт пропорційності, м³/МДж.

Ступінь окислення вуглецю палива ε_C визначається за формулою [6]:

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{q_4}{C^r} \cdot \frac{Q_i^r}{Q_C}, \quad (5)$$

де q_4 – втрати теплоти через механічний недопал, %;

C^r – вміст вуглецю у паливі на робочий стан, %;

Q_C – теплота згоряння вуглецю до CO₂, яка дорівнює 32,68 МДж/кг.

Ступінь окислення вуглецю палива ε_C з точністю до 0,6% можна визначати за формулою:

$$\varepsilon_C = 1 / (1 - q_4 / 100). \quad (6)$$

Урахування фактичних значень втрат теплоти через механічний недопал на ТЕС України у 2017 р. дало наступні значення модифікованих коефіцієнтів пропорційності: для котлів, що працюють на антрациті та пісному вугіллі –

0,3459 м³/МДж з середньоквадратичним відхиленням 0,0082, для котлів, що працюють на газовому вугіллі – 0,3537 м³/МДж з середньоквадратичним відхиленням 0,0024. Значення модифікованого коефіцієнта пропорційності для енергетичного вугілля складає 0,3476 м³/МДж з середньоквадратичним відхиленням 0,0085.

Кількість використаного палива в котлі G пропорційна кількості відпущеної електричної або теплової енергії. Коефіцієнтами пропорційності можна взяти нормативні величини, такі як витрата умовного палива на одиницю відпущеної електроенергії b_e , г/кВт-год, чи витрата умовного палива на одиницю відпущеної теплоти b_t , кг/Гкал.

Тоді кількість витраченого умовного палива $G_{ce(e)}$, т, для відпуску електроенергії в розмірі P , МВт-год, можна розрахувати за формулою:

$$G_{ce(e)} = P \times b_e \times 10^{-3}. \quad (7)$$

Кількість умовного палива $G_{ce(t)}$, т, для відпуску теплової енергії у розмірі W , Гкал, розраховується за формулою:

$$G_{ce(t)} = W \times b_t \times 10^{-3}. \quad (8)$$

Для переходу на витрату натурального палива слід урахувати, що теплота згоряння Q_{ce} умовного палива (вугільного еквівалента) становить 29,3 МДж/кг.

Тоді при відпуску електроенергії кількість витраченого палива визначається за формулою:

$$G_{ce(e)} = 10^{-6} \times P \times b_e \times Q_{ce}/Q_i^r. \quad (9)$$

Кількість валового викиду забруднюючої речовини при відпуску електроенергії E_e , т, можна розрахувати за формулою:

$$E_e = 10^{-12} \times c \times k_1 \times P \times b_e \times G_{ce(e)}. \quad (10)$$

Питомий викид забруднюючої речовини на одиницю відпущеної електроенергії e_e , г/кВт-год, можна визначити за формулою:

$$e_e = 10^{-6} \times c \times k_1 \times b_e \times G_{ce(e)}. \quad (11)$$

При наявності даних тільки про кількість виробленої електроенергії P_{br} кількість відпущеної електроенергії P становитиме 87–90 % від P_{br} .

У разі відпуску теплової енергії кількість палива та кількість викиду забруднюючої речовини визначаються за формулами:

$$G_{ce(t)} = 10^{-3} \times W \times b_t \times Q_{ce}/Q_i^r, \quad (12)$$

$$E_t = 10^{-9} \times c \times k_1 \times W \times b_e \times G_{ce(t)}. \quad (13)$$

Таким чином, кількість викиду забруднюючої речовини E напряму не залежить від теплоти згоряння палива. Якість палива впливає на питому

витрату умовного палива на відпуск енергії.

За цим алгоритмом виконано розрахунки викиду SO₂ на українських ТЕС у 2017 році. В табл. 1, 2 наведено інформацію з марки проектного вугілля, відпуску електроенергії та теплоти, питомих витрат палива, кількості витраченого умовного палива та вугілля на виробництво електроенергії та теплоти на українських вугільних ТЕС у 2017 році. Інформацію узагальнено для генеруючих компаній України.

Таблиця 1 – Інформація з марки проектного вугілля, відпуску електроенергії та теплоти на українських ТЕС у 2017 році

Генеруюча компанія, ТЕС	Марка вугілля	Відпуск		Питомі витрати палива на відпущену	
		електроенергії, МВт·год	теплоти, Гкал	електроенергію, г у.п./кВт·год	теплоту, кг/Гкал
ВСЬОГО		40526103	1182957		
ДОНБАСЕНЕРГО		2120662	67877		
Слов'янська	А	2120662	67877	409,4	222,2
ЦЕНТРЕНЕРГО		5647775	249758		
Вуглегірська	Г, ДГ	3772748	86223	384,2	124,0
Трипільська	А, П	737127	81084	459,7	150,5
Зміївська	А, П	1137900	82451	437,0	149,4
ДНПРОЕНЕРГО		9334872	464604		
Криворізька	П	2340673	43158	430	195,2
Придніпровська	А, П+Г	1137980	398317	431	187,4
Запорізька	Г, ДГ	5856219	23129	350	188,9
ЗАХІДЕНЕРГО		14995008	220893		
Бурштинська	Г, ДГ	7880494	69217	413,4	126,7
Добротвірська	Г, ДГ	2383116	36653	409,6	149,6
Ладизинська	Г, ДГ	4731398	115023	394,6	133,7
СХІДЕНЕРГО		8427786	179825		
Курахівська	Г, ДГ	6095494	143591	397,8	188,4
Луганська	А, П	2332292	36234	441,4	199,5

Таблиця 2 – Інформація з кількості витраченого умовного палива та вугілля на виробництво електроенергії та теплоти на українських ТЕС у 2017 році

Генеруюча компанія, ТЕС	Кількість палива на виробництво			
	електроенергії, т у. п.	теплоти, т у. п.	електроенергії, т	теплоти, т
ВСЬОГО	16256022,3	201648,2	22552614,1	269781,4
ДОНБАСЕНЕРГО	4228901,2	129903,2	5290382,0	164028,5
Слов'янська	12027121,1	71744,9	17262232,1	105752,9

ЦЕНТРЕНЕРГО	868283,9	15080,2	1046214,0	18170,5
Вуглегірська	868283,9	15080,2	1046214,0	18170,5
Трипільська	2285752,3	35210,4	3047771,8	46835,5
Зміївська	1449640,7	10689,1	1942714,2	14324,8
ДНІПРОЕНЕРГО	338872,0	12202,3	456934,3	16453,6
Криворізька	497239,5	12319,0	648123,3	16057,1
Придніпровська	3547004,6	87440,5	4750467,6	110585,7
Запорізька	1004265,8	8424,0	1256352,8	10538,6
ЗАХІДЕНЕРГО	490719,7	74648,56	617430,3	93923,9
Бурштинська	2052019,1	4367,9	2876684,5	6123,3
Добротвірська	6100551,8	29629,7	8510960,4	41431,1
Ладижинська	3257559,8	8767,0	4532207,8	12197,5
СХІДЕНЕРГО	976124,3	5482,9	1352157,2	7595,1
Курахівська	1866867,7	15379,7	2626595,3	21638,6
Луганська	3454429,8	34287,3	5197200,4	52758,5

В табл. 3 наведено інформацію з марки вугілля, технічного аналізу його складу, специфічних показників викиду SO_2 , k_{SO_2} , г/ГДж, та концентрацій SO_2 в димових газах, C , мг/м³, українських вугільних ТЕС у 2017 році. Специфічні показники викиду SO_2 розраховані за методикою наведеною в [6].

Таблиця 3 – Дані про марки проектного палива, технічного аналізу складу вугілля, розраховані значення показників викиду та питомих концентрацій SO_2 в димових газах українських вугільних ТЕС у 2017 році

ТЕС	Марка вугілля	Q_d^p , МДж/кг	A^r , %	W^r , %	S^r , %	k_{SO_2} , г/ГДж	C_{SO_2} , мг/м ³
Слов'янська	А	24,32	17,7	9,5	0,7	570,4	1603
Вуглегірська	Г, ДГ	21,86	21,3	10,6	2,4	2068,3	5890
Трипільська	А, П	21,73	23,7	8,7	1,3	1145,5	3083
Зміївська	А, П/Г, ДГ	22,48	21,4	9,5	2,0	1707,4	4662
Криворізька	П	23,42	21,2	8,4	1,3	1079,0	3019
Придніпровська	А, П/Г, ДГ	23,29	19,3	9,7	1,3	1050,0	2858
Запорізька	Г, ДГ	20,90	23,5	11,3	1,3	12,18,2	3472
Бурштинська	Г, ДГ	21,06	21,4	12,0	1,3	1200,0	3366
Добротвірська	Г, ДГ	21,15	24,3	9,4	1,6	1387,1	3925
Ладижинська	Г, ДГ	20,83	22,0	12,7	1,4	1304,7	3700
Курахівська	Г, ДГ	18,07	33,3	9,2	1,4	1400,0	3809
Луганська	А, П	23,84	18,5	8,4	1,3	1036,1	2846

У табл. 4 наведено результати розрахунків викидів діоксиду сірки на ТЕС України у 2017 році за запропонованим алгоритмом: кількості валового викиду

SO₂ при відпуску електроенергії, E_e , т, теплоти, E_t , т, та сумарна кількість, E , т. Для порівняння наведено результати розрахунків викидів SO₂ на ТЕС України у 2017 році за методиками [3–5] та оперативні дані ТЕС. Показано, що результати розрахунків викиду SO₂ добре збігаються з оперативними даними ТЕС та розрахунками за іншими методиками, які використовують дані елементного та технічного аналізу вугілля.

Таблиця 4 – Результати розрахунків викидів SO₂ на ТЕС України у 2017 році за запропонованим алгоритмом, за методиками [3–6] та оперативні дані ТЕС

ТЕС	E_e , тис. т	E_t , тис. т	E , тис.т	E , тис. т	E , тис. т	E , тис. т
	за запропонованим алгоритмом			за k_{SO_2} , [3]	за C_{SO_2} , [4–5]	оперативні дані ТЕС
ВСЬОГО	605,8	6,8	612,6	610,6	606,7	608,3
ДОНБАСЕНЕРГО	14,1	0,2	14,3	14,5	14,5	14,0
Слов'янська	14,1	0,2	14,3	14,5	14,5	13,9
ЦЕНТРЕНЕРГО	122,6	1,6	124,2	121,9	124,5	122,0
Вуглегірська	88,5	0,6	89,1	85,1	88,8	87,5
Трипільська	10,6	0,4	11,0	11,7	10,9	11,7
Зміївська	23,5	0,6	24,1	25,1	24,8	22,7
ДНІПРОЕНЕРГО	118,8	2,6	121,4	120,7	119,8	119,7
Криворізька	30,7	0,3	31,0	31,0	30,0	31,1
Придніпровська	14,2	2,2	16,4	16,8	16,0	16,0
Запорізька	73,8	0,2	74,0	72,8	73,83	72,6
ЗАХІДЕНЕРГО	22,5	1,1	226,0	223,0	222,5	223,3
Бурштинська	113,7	0,3	114,0	112,4	111,5	113,8
Добротвірська	39,7	0,2	39,9	39,8	39,6	38,6
Ладижинська	71,6	0,6	72,2	70,8	71,4	71,0
СХІДЕНЕРГО	125,4	1,3	126,7	130,5	125,4	129,4
Курахівська	95,7	1,1	96,8	99,3	95,7	99,3
Луганська	29,7	0,2	29,9	31,1	29,8	30,1

За запропонованим алгоритмом для оцінки максимальних викидів забруднюючої речовини як середні концентрації можна взяти значення технологічних нормативів, визначених в наказі Мінприроди від 16.02.2018 №62 [7]. Результати цих розрахунків для викидів SO₂ на ТЕС України у 2017 році наведено в табл. 5.

Порівняння результатів розрахунків, наведених в табл. 4 та 5 показало, що сумарний рівень викидів SO₂ на ТЕС України у 2017 році не перевищував максимально можливий згідно Наказу Мінприроди № 62 та Національному

плану скорочення викидів забруднюючих речовин від великих спалювальних установок [1, 2].

Таблиця 5 – Результати розрахунків максимально можливих викидів SO₂ на ТЕС України у 2017 році

ТЕС	Марка вугілля	C _{SO₂} , мг/м ³ з Наказу Мінприроди №62	E _e , тис. т	E _b , тис. т	E, тис. т
ВСЬОГО			856,4	9,7	866,1
ДОНБАСЕНЕРГО			41,1	0,7	41,8
Слов'янська ТЕС	А	4500	41,1	0,7	41,8
ЦЕНТРЕНЕРГО			120,7	1,7	122,4
Вуглегірська ТЕС	Г, ДГ	5100	78,6	0,6	79,2
Трипільська ТЕС	А, П	4500	17,4	0,6	18,0
Зміївська ТЕС	А, П/Г, ДГ	4500	24,6	0,6	25,2
ДНПРОЕНЕРГО			187,3	4,0	191,3
Криворізька ТЕС	П	4500	46,8	0,4	47,2
Придніпровська ТЕС	А, П/Г, ДГ	4500	31,5	3,4	34,9
Запорізька ТЕС	Г, ДГ	5100	109,0	0,2	109,2
ЗАХІДЕНЕРГО			327,9	1,6	329,5
Бурштинська ТЕС	Г, ДГ	5100	173,9	0,5	174,4
Добровірська ТЕС	Г, ДГ	5100	52,5	0,3	52,8
Ладижинська ТЕС	Г, ДГ	5100	101,5	0,8	102,3
СХІДЕНЕРГО			179,5	1,8	181,2
Курахівська ТЕС	Г, ДГ	5100	131,7	1,4	133,1
Луганська ТЕС	А, П	4500	47,8	0,3	48,1

ВИСНОВКИ:

1. Запропоновано алгоритм оцінки викиду забруднюючої речовини (діоксиду сірки, пилу та оксидів азоту) в залежності від кількості виробленої (відпущеної) електроенергії (МВт·год) чи виробленого тепла (Гкал) за кожен рік роботи спалювальної установки у складі енергоблоку чи котельні.
2. За алгоритмом оцінки викиду забруднюючої речовини виконано розрахунки викидів діоксиду сірки на ТЕС України у 2017 році. Результати розрахунків збігаються з наявними оперативними даними ТЕС та результатами розрахунків за іншими методиками.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 р. №

- 796-р. Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245255506&cat_id=245255478 (дата звернення 30.09.2019 р).
2. Вольчин І. А. Техніко-економічні аспекти виконання Національного плану скорочення викидів //Збірка наукових праць XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку».– К. – 2017.– С. 5–7.
 3. Volchyn I., Haponych L. Estimate of the sulfur dioxide concentration at thermal power plants fired by donetsk coal// Power Technology and Engineering. – Vol. 48, # 3. – 2014. – P. 218–221.
 4. Volchyn I., Haponych L. Engineering method for calculating the parameters of flue gas parameters of coal-fired thermal power plants based on solid fuel characteristics // Ukrainian Journal of Food Science. – 2016. – Volume 4. Issue 2. – P. 327–338.
 5. Вольчин І. А., Гапонич Л. С. Розрахунок параметрів димових газів вугільних теплових електростанцій на основі характеристик твердого палива // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2016. – №1. – С. 49–55.
 6. ГКД 34.02.305–2002. «Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від енергетичних установок. Методика визначення». К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2002. – 42 с.
 7. Про внесення змін до наказу Мінприроди від 22 жовтня 2008 року № 541//Офіційний вісник України – 2018 р., № 28, стор. 290, стаття 1009, код акта 89674/2018. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0290-18> (дата звернення 30.09.2019 р).

УДК 662.183.2

**ЯВЛЕНИЯ СИНЕРГИЗМА ПРИ СОЗДАНИИ И КОНВЕРСИИ
КОМПОЗИЦИОННОГО СЫРЬЯ ИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ
И ПОЛУПРОДУКТОВ КОКСОХИИИ**

**Шендрик Т. Г., д.х.н, проф.; Тамко В. А., к.х.н.; Шевкопляс В. Н., к.х.н.;
Бован Л. А.**

**Институт физико-органической химии и углехимии (ИнФОУ)
им. Л. М. Литвиненко НАН Украины**

В связи с событиями последних 5 лет на востоке Украины ситуация в теплоэнергетике страны радикально изменилась из-за недоступности

антрацитовых ресурсов. Ученые Института угольных энерготехнологий НАНУ разработали, а предприятия угольной теплоэнергетики внедрили принципы перехода тепловых станций на сжигание низкометаморфизованного угля [1]. Тем не менее, исследовательский интерес к нетопливому использованию энергетических углей низкой степени метаморфизма представляется нам оправданным из-за постоянно меняющейся ситуации на рынке твердого топлива. При этом промышленное производство продолжает оказывать техногенную нагрузку на окружающую природную среду (ОПС). Применение углеродных адсорбентов (УС) было и остается одним из наиболее действенных способов очистки всех компонентов Природы от загрязнителей. Производство УС может иметь разнообразные сырьевые источники, в том числе, из композиционного сырья на основе углей разных марок и отходов различной природы [2].

Использование в технологии получения сорбентов полупродуктов, побочных продуктов, углеводородных продуктов, «отходов» (устаревший термин) коксохимии представляется актуальным и с точки зрения циркулярной экономики, которая, в отличие от линейной, предполагает возвращение отходов (побочных продуктов) в основной производственный цикл [3]. Комплексный подход к использованию упомянутых «отходов» – их совместный термолит с другим углеродным компонентом – углем – является весьма перспективным, поскольку позволяет получить не только обуглероженный твердый продукт (карбонизат) улучшенного качества, но и летучие продукты при щадящих условиях [4]. Дальнейшее использование карбонизатов имеет широкие перспективы (бездымное топливо, технический углерод, предшественник углеродных сорбентов и др.). В случае термохимической конверсии смесевых композиций различных видов сырья практически всегда наблюдаются эффекты неаддитивности (как положительные (синергизм), так и отрицательные (антагонизм) [2, 5, 6].

Одной из целей работы было установление оптимального соотношения масс ископаемого угля и полупродуктов коксохимзавода (КХЗ) для получения высокого выхода карбонизата, установление наличия или отсутствия проявлений синергизма на всех стадиях процесса и их влияние на свойства олучаемых продуктов.

Для создания смесевых композиций с углем использовали углеводородные продукты («отходы») коксохимзавода «Макеевкокс»: каменноугольную смолу (СКХЗ), полимеры (П), кислую смолку (КС), кубовый остаток (КО), фусы (Ф)

[7] и уголь марок Д и Г (табл. 1).

Таблица 1 – Характеристика угля

Образец угля	Технический анализ, %			Элементный анализ, % ^{dat}				
	W ^a	A ^d	V ^{dat}	С	Н	S	N	О
Д	11,1	1,8	43,8	80,0	5,3	1,0	1,9	11,8
Г	2,9	2,7	35,6	83,5	5,2	0,9	1,7	8,7

Установлен эффект неаддитивности для показателя прочности (эффективная прочность (ЭП) или сопротивление вдавливанию) [7] образующегося композиционного сырья, величина которой максимальна при содержании добавки в смеси 5–15% для угля Г и 15±5% для угля Д (рис.1).

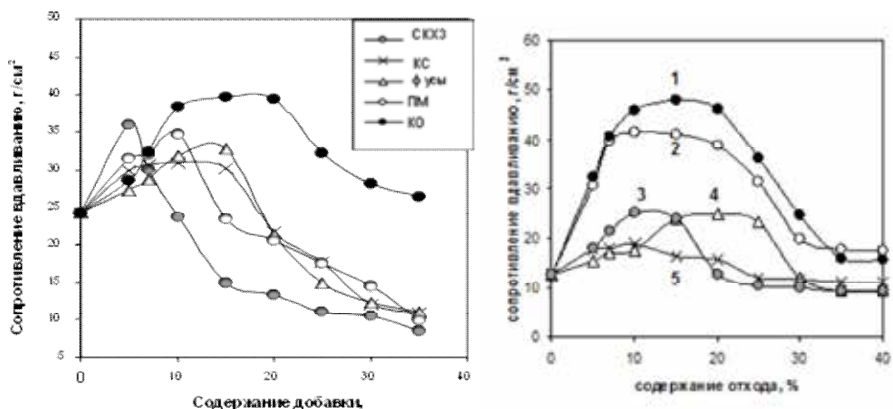


Рис.1. – Эффективная прочность смесей «уголь Г – полупродукт КХЗ» (слева) и «уголь Д – полупродукт КХЗ» (справа).

Видно также, что при увеличении содержания более 15% добавки в смеси с газовым углем происходит резкая потеря способности смеси к сопротивлению вдавливанию [7], когда смесь расплывается и становится неудобной для дальнейшего использования. В случае смесей угля Д оказывается, что сопротивление композиционных систем к вдавливанию (эффективная прочность) сохраняется на определенном уровне в более широком интервале концентраций, она не падает ниже ЭП исходного угля. Смесей угля Г ведут себя иначе – исходный уголь имеет высокую ЭП, а в смесях с добавками более 15% резко снижается сопротивляемость вдавливанию.

Количественную оценку величины неаддитивности (или СЭ – синергетического эффекта) (табл. 2) для обеих марок угля получили как разницу между экспериментом (в точке максимума ЭП при содержании

полупродукта 5–15%) и $\text{ЭП}_{\text{расчет}}$, рассчитанной по правилу аддитивности.

Взаимосвязь СЭ и показателя плотности полупродуктов КХЗ определили из данных таблицы 2. Величина СЭ (13–16 отн. ед) для газового угля практически не зависит от природы углеводородного продукта, в то время как для смесей угля Д она меняется в широком диапазоне значений. При этом степень неаддитивности (или СЭ) зависит обратно пропорционально от свойства (плотность) жидкого углеводородного продукта КХЗ (рис. 2).

Таблица 2. Характеристика углеводородных продуктов КХЗ и величины СЭ

Параметр	Фусы	КС	Полимеры	СКХЗ	КО
Плотность, г/см^3	1,25	1,27	1,12	1,15	0,96
Зольность, %	6,4	0,2	0,1	0,1	5,2
Синергетический эффект (СЭ), отн. ед.					
Смесь с углем Д	12	7	27	16	35
Смесь с углем Г	15	13	15	15	16

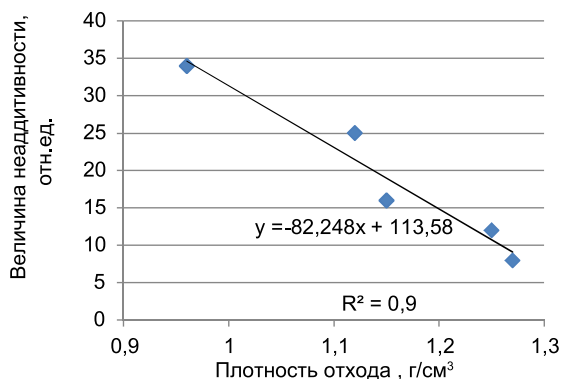


Рис. 2. Зависимость СЭ для смесей «уголь Д – «отход» от плотности «отходов»

С целью получения обуглероженного продукта – карбонизата с новыми качествами – проведен термолиз изученных смесей (при содержании добавок 15%) в условиях, позволяющих получить высокий выход твердого продукта. Термолиз угля и смесей выполняли в лабораторной установке со стационарным слоем [7]. Нагревание образца (80 г) проводили со скоростью $4,0 \pm 0,5$ град / мин до температуры карбонизации (400 – 700 °С) с дальнейшей изотермической выдержкой в течение 0,5 час.

Оказалось, что влияние типа углеводородной добавки на выход карбонизата для смесей угля Г практически одинаково – снижение с 74% (уголь без добавок) до $67 \pm 1\%$ для смесей при температуре 450 °С, и с 67% (уголь без

добавок) до $63 \pm 1\%$ для смесей при температуре термоллиза 700°C . Иная картина наблюдается для угля марки Д и его смесей. Выявилась четкая линейная взаимосвязь выхода карбонизата и плотности добавленного продукта коксохимии (рис. 3).

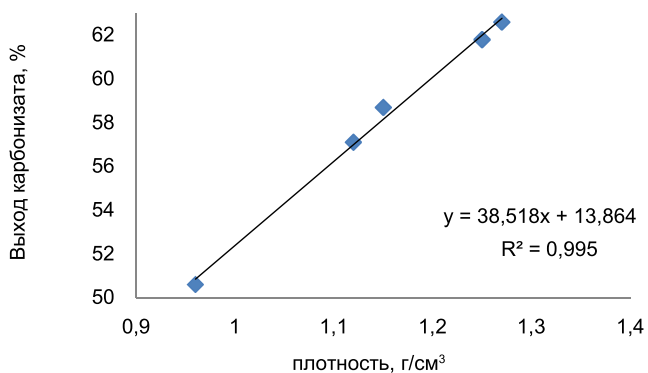


Рис. 3. Зависимость выхода карбонизата (450°C) из смесей с углем Д от плотности добавки

Из полученных данных следует, что выход твердого продукта будет зависеть обратно пропорционально от величины СЭ, выявленного при создании смесевых композиций длиннопламенного угля. А это означает, что чем ниже эффект синергизма касательно твердого продукта, тем в большей степени СЭ скажется на выходе летучих. Учитывая, что коль скоро часть органических веществ отхода КХЗ принимает участие в формировании «прочной» композиции, в процессе термоллиза она непременно будет встраиваться в углеродный каркас твердого карбонизата, изменяя его качества. Именно поэтому мы изучили некоторые свойства (механические и сорбционные) полученных твердых продуктов. Как и в случае упрочнения карбонизатов из смесевых композиций смолы КХЗ с бурым углем [4], прочность (МП) карбонизатов, полученных из угля Д без добавок при 600 и 700°C существенно ниже (МП = $67 - 65\%$), чем этот же показатель для всех сложных карбонизованных систем (МП = $80 - 94\%$). В этой же работе описано явление синергизма для выхода горючих газов в случае паровой активации смеси 1:1 бурого угля и смолы КХЗ.

Определение сорбционных свойств приготовленных карбонизатов по отношению к ионам меди A_{Cu} , йоду A_{I} (ГОСТ 6217-74) и к красителю – метиленовому голубому A_{MG} (ГОСТ 4453-74) показало, что эти твердые продукты карбонизации не обладают высокой сорбционной способностью.

Величина A_{ij} лежит в пределах 0 – 49,4 мг/г. Осветляющая способность карбонизатов, оцениваемая параметром A_{MG} , тоже невысока и лежит в интервале 0 – 54,5 мг/г.

Влияние жидких продуктов КХЗ на качества твердого продукта термолитиза, как видим, ограничивается формированием высокопрочного углеродного каркаса, а не созданием развитой системы пор. Этой цели служит специальная стадия – температурное воздействие водяным паром на высокопрочные карбонизаты с целью получения пористого активированного углерода с механической прочностью не менее 75%. Такие сорбенты являются востребованными и конкурентноспособными на рынке сорбентов для очистки рабочей зоны АЭС от радиоактивных газовых продуктов [8].

Применение и изучение композиционного сырья и продуктов его термолитиза на основе низкометаморфизованных углей и полупродуктов коксохимии позволяет получить УС с оптимальными сорбционными ($S_{уд} - 500-900 \text{ м}^2/\text{г}$) и механическими свойствами ($MP \geq 75\%$) [9].

Исследование эффектов неаддитивности при создании композиционного (смесового) сырья с использованием углей и углеводородных продуктов коксохимии является, на наш взгляд, весьма полезным с точки зрения прогнозирования поведения смесей в любых термохимических процессах, будь то пиролиз, активация или сжигание. Это позволяет учитывать как особенности типа «отхода», так и влияние метаморфизма углей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Чернявский Н.В., Косячков А.В., Росколупа А.И. Разработка малозатратных технических решений для перевода антрацитовых котлов ТЭС и ТЭЦ на сжигание газового угля // Зб. наук праць «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку». XIII Міжнар. наук.- практ. конф., 26–28 вересня 2017 р., м. Київ, с. 48–50.
2. Кузнецов Б.Н., Шендрик Т.Г., Щипко М. Л., Чесноков Н.В., Шарыпов В.И., Осипов А.М. Глубокая переработка бурых углей с получением жидких топлив и углеродных материалов // Отв. ред. Г. И. Грицко. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. - 212 с.
3. Череватський Д.Ю., Солдак М.О., Кандермеєва Д.С. Щодо енергетичного втілення принципів циркулярної економіки у старопромислових шахтарських районах // Зб. наук праць «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку». XIII Міжнар. наук.- практ. конф., 26–28 вересня

2017 р., м. Київ, с. 37–40.

4. Шендрик Т.Г., Тамко В.А., Бован Л.А. Совместная конверсия угля и жидких углеродсодержащих отходов в продукты высокой потребительской ценности // Экология и промышленность. – 2014.– №3.– С. 61–66.
5. Suelves, I. Synergetic effects in the co-pyrolysis of coal and petroleum residues: influences of coal mineral matter and petroleum residue mass ratio / I. Suelves, R. Moliner, M. J. Lázaro // J. Anal. Appl. Pyrolysis. – 2000. – Vol. 55. – P. 29 – 41.
6. Synergistic effects on co-pyrolysis of lignite and high-sulfur swelling coal / J. Fei, J. Zhang, F. Wang, J. Wang // J. of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2012. – Vol. 95, Is. 1. – P. 61 – 67.
7. Процесс и продукты термолитиза угля Д с отходами коксохимических заводов / В. А. Кучеренко, В. А. Тамко, Т. Г. Шендрик, В. М. Шевкопляс // Вопросы химии и хим. технологии. – 2017. – № 4 (111). – С. 56–63.
8. Измерение прочности адсорбентов, предназначенных для использования при восстановлении адсорберов типа АУ-1500 систем вентиляции АЭС / В.Г. Колобродов, В. И. Соколенко, Э.И. Винокуров, Т.К. Григорова, Р. М. Сибилева, М.А. Хажмурадов // Вопросы атомной науки и техники. — 2011. – № 6. – С. 76–78.
9. Шендрик Т.Г., Шевкопляс В.Н., Цыба Н.Н. Динамика развития пористости при паровой активации композиционного углеродного сырья. // Материалы 9-й Междунар. конф «Химическая кинетика и термодинамика», Тверь, май, 2019, стр. 384–385.

УДК 662.612.3

РОЗПОДІЛ КИСНЮ У НЕСКІНЧЕННІЙ ЦИЛІНДРИЧНІЙ ВУГЛЕЦЕВІЙ ПОРИ ПРИ ГОРІННІ

**Квіцинський В. О.; Кривошеев С. І., к.т.н.; Макарчук В. М., к.ф.-м.н.;
Марущак С. В.**

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

Розглянуто задачу визначення розподілу кисню і рівняння поверхні горіння для нескінченної, початково циліндричної, вуглецевої пори при стаціонарному горінні. Задача є прийнятним аналогом при дослідженні вигорання пори з довжиною, яка набагато перевищує її радіус r_p .

Вважається, що в початковий момент часу внаслідок підвищення

температури T вуглець поверхні і циліндричної пори починає вигоряти. Оскільки вигорання відбувається по нормалі до поверхні і його інтенсивність пропорційна концентрації окислювача, яка максимальна біля входу в пору, пора починає «розкриватись» і її поверхня приймає форму воронки (рис. 1).

Оскільки пора вважається нескінченною, то виникне ситуація, коли динамічний перехідний період вигорання завершиться, і процес стане стаціонарним – поверхні вуглецю та пори будуть синхронно рухатись вздовж вісі Ox з однаковою швидкістю.

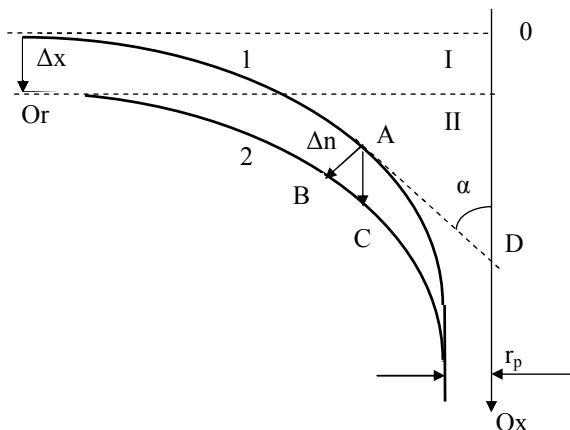


Рис. 1. Продовжний осьовий розріз пори: 1 – поверхня пори в момент часу t , 2 – поверхня пори в момент часу $t+\Delta t$, I і II – положення поверхні вуглецю у той же час. Прямая AD – дотична до поверхні пори в t . A.

Умову рівномірного вигорання можна визначити з рис. 1. Нехай в результаті вигорання за час Δt довільна т. A поверхні пори переміститься в т. B на відстань $AB = \Delta n$ перпендикулярно до прямої AD. Також можна вважати, що т. A перемістилась в т. C, $AC = \Delta x$, яка знаходиться на тій же відстані r від осі пори. При малих переміщеннях ці відстані зв'язані співвідношенням $\Delta n = \Delta x \cdot \sin(\alpha)$, де α – кут нахилу дотичної AD до вісі Ox , $\text{tg}(\alpha) = -dr/dx$. Виконання умови $\Delta x = \Delta n / \sin(\alpha) = \text{const}$ для всіх точок поверхні пори саме і є умовою її рівномірного вигорання (вся пора переміщується в просторі на відстань $\Delta x = \text{const}$, як суцільне ціле).

Цю умову можна викласти в іншому вигляді для концентрації кисню $\rho(x)$

$$\text{const} = \rho(x) / \sin(\alpha) = \rho_0, \text{ або } \rho(x) = \rho_0 \cdot \sin(\alpha), \quad (1)$$

оскільки величина вигорання Δn пропорційна до концентрації $\rho(x)$, а умова сталого вигорання має виконуватись і для поверхні вуглецю, де $\rho(x=0) = \rho_0$ и

$$\sin(\alpha) = 1.$$

Залежність (1) для $\rho(x)$ має бути також рішенням рівняння стаціонарної дифузії для кінчної пори [1]

$$d(D_{1,2}r^2 d\rho/dx)/dx - 2rK\rho(1+(dr/dx)^2)^{1/2} = 0, \quad (2)$$

де $D_{1,2}$ – коефіцієнт дифузії ($D_1 = \lambda u/3$ для молекулярної дифузії, $D_2 = 2ru/3$ для Кнудсенівської дифузії, коли $2r < \lambda$, λ – довжина вільного пробігу молекули кисню, u – її теплова швидкість), K – сумарна константа швидкості всіх хімічних реакцій, у яких зникає кисень.

Підстановка виразу (1) в рівняння (2) з наступним його рішенням дозволяє визначити залежність $r(x)$ для поверхні пори, за якої реалізується розподіл концентрації (1), та явний вид функції $\rho(x)$.

Застосування запропонованої методики розглянемо на прикладі вигорання воронки від нескінченної пори малого початкового радіусу $r_p < \lambda/2$. Всю довжину пори розіб'ємо на дві ділянки – перша від входу в пору до перерізу, де $r = \lambda/2$ ($D=D_1$), друга – її продовження до $x \rightarrow \infty$ ($D=D_2$). На межі ділянок виконуються умови безперервності $\rho_1 = \rho_2$, $d\rho_1/dx = d\rho_2/dx$.

Підстановка виразу (1) в рівняння (2) дає для кожної ділянки

$$d(D_i r^2 d(\sin(\alpha_i))/dx + Kr^2)/dx = 0, \quad i=1,2 - \text{номер ділянки.} \quad (3)$$

Використано рівності $\text{tg}(\alpha) = -dr/dx$, $\sin(\alpha) = -(dr/dx) \cdot (1+(dr/dx)^2)^{-1/2}$.

Інтегруванням (3) отримуємо вирази для потоків окислювача в порі

$$D_i r^2 d(\sin(\alpha_i))/dx + Kr^2 = C_{i1} = Kr_p^2, \quad (4)$$

де C_{i1} – сталі, які визначені з граничних умов для потоків.

Рішення диференційного рівняння (4) для i -ої ділянки

$$D_i r^2 \cdot d(\sin(\alpha_i))/dx = K(r_p^2 - r^2) \quad (5)$$

після заміни $d(\sin(\alpha_i))/dx = d(\cos(\alpha_i))/dr$ має вид

$$\cos(\alpha_1) = 1 + (3/4 + r_p^2/\lambda^2 - \ln(\lambda/2r_p))/2 - r_p^2/\lambda r - r/\lambda \cdot 3K/u = f_1(r), \quad (6)$$

$$\cos(\alpha_2) = 1 + (1/2 - r_p^2/2r^2 + \ln(r_p/r)) \cdot 3K/2u = f_2(r), \quad (7)$$

(сталі інтегрував визначені з граничних умов для концентрацій).

Вирази (6) – (7) дозволяють визначити залежності концентрацій $\rho_i(r)$ за формулою (1)

$$\rho_i(r) = \rho_0 \cdot \sin(\alpha_i) = \rho_0 \cdot (1 - f_i(r)^2)^{1/2}. \quad (8)$$

Використовуючи рівність $dr/dx = -\text{tg}(\alpha_i) = -(1-f_i(r_i)^2)^{1/2}/f_i(r_i)$ можна визначити неявний вид залежності $r_i(x)$

$$x = - \int f_i(r_i) dr_i / (1 - f_i(r_i)^2)^{1/2}, \quad (9)$$

де при інтегруванні треба враховувати межі ділянок:

- 1) $0 < x < x_1 = x(r = \lambda/2)$, $r_0 > r > \lambda/2$, $r_0 = r_1(\cos(\alpha_1) = 0) \approx \lambda u / 3K$ – на поверхні вуглецю,
 2) $x_1 < x < \infty$, $\lambda/2 > r > r_p$.

Результат застосування запропонованої методики визначення просторових залежностей концентрації кисню $\rho(x)/\rho_0$ та форми поверхні вуглецевої пори $r(x)/\lambda$ при стаціонарному горінні наведено на рис. 2–3. Розрахунок виконано для мікропори $r_p = 0,8$ нм при температурі $T = 1500$ К. Константи швидкостей реакцій горіння $K = K_1 + K_2$ взяті з [2]:

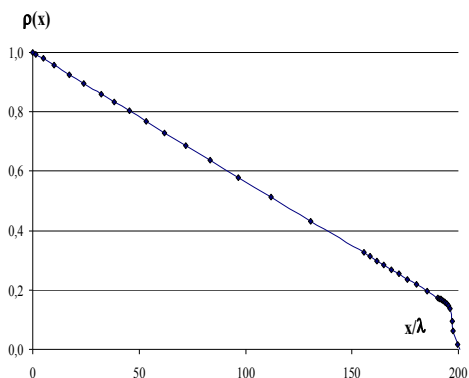
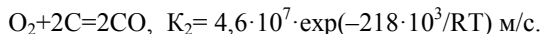
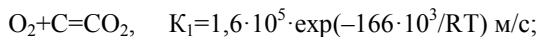


Рис. 2. Просторова залежність нормованої концентрації кисню

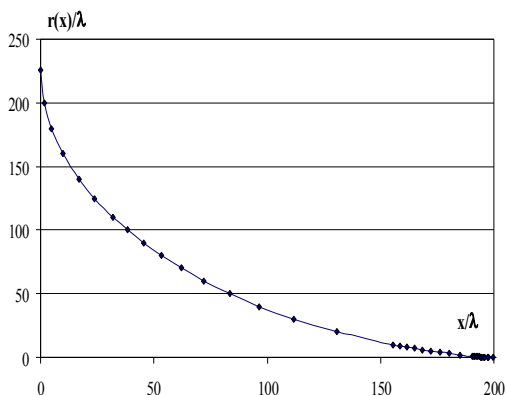


Рис. 3. Форма поверхні вуглецевої пори

ВИСНОВОК:

Вирази (8) – (9) повністю визначають рішення задачі встановлення

аналітичних просторових залежностей розподілу кисню $\rho(x)$ вздовж пори та рівняння поверхні горіння $r(x)$ для нескінченної, початково циліндричної, вуглецевої пори при стаціонарному вигоранні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Оренбах М. С., Реакционная поверхность при гетерогенном горении. // Новосибирск: «Наука», 1973. – 200 с.
2. Annamalai A., Ryan W., Interactive processes in gasification and combustion–II. Isolated carbon, coal and porous char particles // Progress in Energy and Combustion Science – 1993, v.19, N5, p.383–446.

УДК 674:621.928.93

ВЛИЯНИЕ УПЛОТНЕНИЯ НА ВЫХОД И СОСТАВ ЛЕТУЧИХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Зубкова В., д.х.н.; Стройвас А., к.х.н.; Белецки М.

Институт Химии, Университет Яна Кохановского в Кельцах, Польша

Ограничение использования углей для получения электроэнергии способствует поиску использования иных видов топлива, в том числе биомассы. Однако, во время сжигания биомассы кроме выделения CO_2 , поглощаемого растениями в процессе фотосинтеза, выбрасываются в атмосферу также вредные химические соединения, такие как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), альдегиды, кетоны, фенолы, спирты и т. д. Первой стадией процесса сжигания является пиролиз. В основном биомасса сжигается в виде брикетов, пеллет, таблеток. То есть, в уплотнённом виде, который значительно упрощает её транспортирование. Поэтому целью настоящего исследования было выяснение влияния уплотнения отходов биомассы сельскохозяйственной продукции без добавления связующего на выход и состав летучих продуктов пиролиза.

Объектом исследования были такие отходы сельскохозяйственной продукции как скорлупа грецких орехов (СГО) и шелуха семечек подсолнуха (ШСП). Эти отходы были высушены до температуры 105°C , измельчены до размеров зёрен менее $0,2$ мм. После чего был определён их элементный состав (Таблица 1).

Таблица 1. Элементный состав исследованных проб

Проба	Состав, %				
	C	H	N	S	O ^{diff}
СГО	43,41	5,66	1,98	0,11	48,84
ШСП	45,82	6,32	2,61	0,14	45,11

Высушенные пробы в виде сыпучей массы и в виде таблеток были пиролизованы в измерительном комплексе TG/FT-IR в атмосфере чистого азота (99,999%). Нагрев производился в термовесах Q50 фирмы TA Instruments до температуры 750 °С со скоростью 4 °С мин⁻¹. Летучие продукты с помощью интерфейса транспортировались к спектрофотометру Nicolet iS10, firm ThermoScientific с целью регистрации их спектров FT-IR.

На рис. 1 представлены кривые изменения массы и скорости изменения массы в зависимости от температуры для пробы СГО. Как следует из рис. 1, уплотнение массы пробы СГО существенно не влияет на выход летучих продуктов. Однако, прослеживается тенденция увеличения скорости потери массы при температуре около 330 °С и уменьшения выхода летучих продуктов в конце пиролиза.

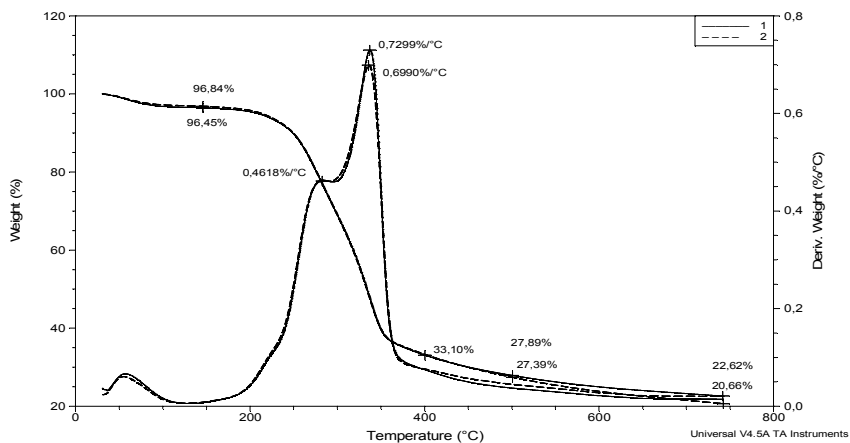


Рис. 1. Кривые TG и DTG пробы СГО (1 – уплотнённая, 2 – сыпучая)

На рис. 2 представлены кривые потери массы и скорости изменения массы в зависимости от температуры для пробы ШСП. Уплотнённая проба ШСП в отличие от уплотнённой пробы СГО во время пиролиза характеризуется более

высокой скоростью потери массы при температурах 310–320 °С, следовательно, меньшим выходом твёрдого остатка.

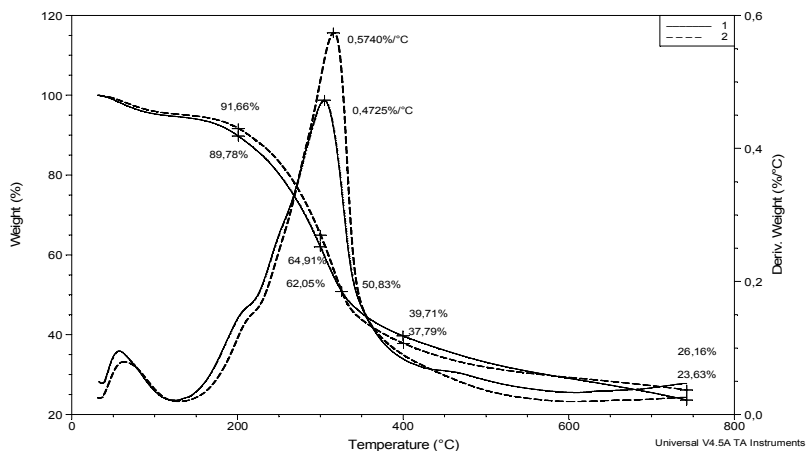


Рис. 2. Кривые TG и DTG пробы ШСП (1 – уплотнённая, 2 – сыпучая)

На рис. 3 представлены спектры FT-IR летучих продуктов пиролиза уплотнённых и сыпучих проб. Для облегчения сравнения спектры представлены таким образом, что интенсивность полосы, соответствующей присутствию CO₂ в составе летучих продуктов, была одинаковой.

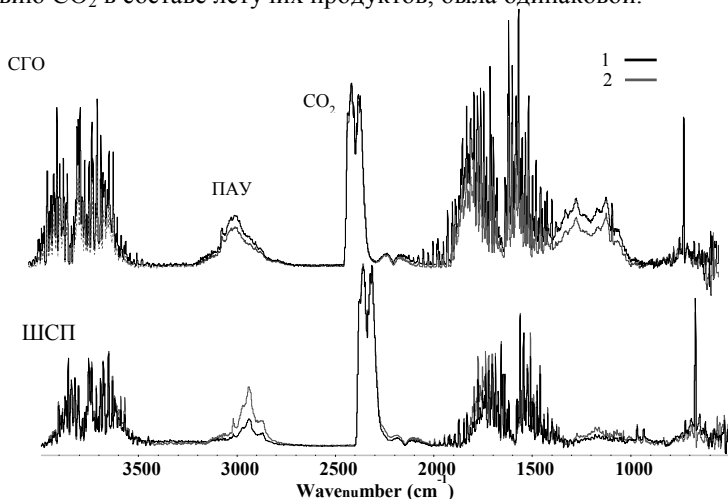


Рис. 3. Спектры FT-IR летучих продуктов пиролиза исследуемых проб

Как следует из рис. 3, уплотнение пробы СГО во время пиролиза способствует повышению относительного содержания ПАУ, водяного пара, а также содержания альдегидов, кетонов (интервал 1800–1600 см⁻¹), фенолов и спиртов (интервал 1350–1000 см⁻¹) в пиролитическом газе. Уплотнение пробы ШСП наоборот вызывает снижение относительного содержания этих соединений в составе летучих продуктов пиролиза.

Принимая во внимание вышеизложенное, можно заключить, что для уменьшения содержания вредных веществ в продуктах сгорания исследованных отходов сельскохозяйственной продукции, скорлупу грецких орехов лучше сжигать в сыпучем виде, а шелуху подсолнечника – в виде брикетов, пеллет или таблеток.

УДК 662.62

ТРАНСФОРМАЦІЇ ВУГІЛЬНИХ РЕГІОНІВ НА ПРИКЛАДІ ЗАХІДНОЇ ЄВРОПИ

Бондзик Д. Л., к.т.н; Безценний І. В., к.т.н.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

Зміни в енергетичній стратегії держави призводять до змін у багатьох сферах, які до цього дотичні. Зменшення вироблення електроенергії на вугіллі пов'язане не тільки із закриттям шахт, але й з багатьма екологічними, соціальними, економічними та енергетичними проблемами. В Україні, а особливо на Донбасі, сильно розвинена інфраструктура видобутку і збагачення вугілля, а також чимало ТЕС, які працюють на вугіллі. Значна кількість шахт, які закриваються, великі відвали породи, перспективи закриття вугільних ТЕС. Зважаючи на це, необхідно завчасно розробити плани закриття таких підприємств з врахуванням працевлаштування персоналу шахт і станцій, забезпечення існування міст, які зав'язані на роботу основного підприємства, зміни в екології, що виникли при роботі підприємств, а також які виникають після закриття, зміни енергобалансу районів.

В Євросоюзі вже тривалий час поширюється політика зменшення використання викопних палив, а контроль дотримання законодавства досить жорсткий. Тому перспективи необхідних заходів відновлення територій і захисту природи обговорюються ще при відкритті шахт чи інших вуглеобробних підприємств. Через суттєві геологічні, суспільні, соціальні та

законодавчі відмінності в різних країнах Євросоюзу напряду переносити навіть дуже вдалий досвід трансформації вугільних регіонів неможливо. Тому за програмою Горизонт 2020 було започатковано проект «ТРЕЙСЕР – смарт стратегії для трансформації вугільних регіонів», в якому досліджується 9 регіонів Європи (включаючи Донецьку область, Україна) де закриваються вугільні підприємства.

На першій зустрічі учасникам проекту були представлені вдалі приклади реабілітації вугільних регіонів в Лужицькому буровугільному басейні у Німеччині. Складність реабілітації цього району була пов'язана із великими площами земель, які потрібно було відновлювати – більше 300 км², так як видобування бурого вугілля проводилося відкритим способом (компанія LMBV). Території кар'єрів не тільки не були непридатні до сільськогосподарського використання, але й підземні води, що їх підтоплювали, мали дуже низький рН (нижче 3) та мали високий вміст сірки.

Основними заходами, які виконані для подальшого використання порушених земель були відновлення сільськогосподарської придатності, відновлення водного балансу земель, створення генераторних потужностей на базі відновлюваних джерел енергії, створення туристично-привабливих зон.

Забезпеченням відновлення сільськогосподарської придатності займалася видобувна компанія – власниця територій, яка зобов'язана відновити ландшафт, нанести на нього родючий шар і засіяти рослинами обраними для відновлення територій. Планування нового ландшафту проводиться із залученням місцевого населення. Термін цих робіт після завершення видобутку складає приблизно 7 років. По завершенню цього терміну компанія має право здавати відновлені і рекультивовані землі в оренду і тільки через 20 років, якщо до компанії не виникне зауважень, вона має право їх продати.

Для відновлення водного балансу земель, де дефіцит підземних вод складав 13 млрд м³, використовувалися води місцевих річок, таких як Шпре, Ельба, а також очищені шахтні води. За 27 років робіт цей дефіцит вдалося зменшити до 2,1 млрд м³.

Закриття вугільних шахт відбувалося паралельно із закриттям вугільних електростанцій, тому виникав локальний дефіцит електроенергії. Для часткової компенсації на відновлених землях встановлювалися сонячні електростанції, вітрогенератори та малі ТЕЦ на біомасі.

Закриття вугільних підприємств призвело до зменшення населення регіонів. Тому для збільшення привабливості і створення нових робочих місць

на цих територіях зводяться туристичні об'єкти. Наприклад, на створених нових озерах будуються плаваючі готелі, на узбережжі озер вирощені виноградники, з яких робиться місцеве вино, а із залишків видобувної техніки створюються індустриальні пам'ятники.

Фінансування таких робіт виконувалося як за власні кошти видобувної компанії, так і з залученням держаного фінансування, а також грантів Євросоюзу.

Зрозуміло, що напряму перенести подібний досвід в Україну неможливо, але це показує важливість фундаментального підходу з врахуванням усіх факторів, які виникають при закритті вугільних підприємств.

МОДЕРНИЗАЦИЯ УГОЛЬНЫХ МЕЛЬНИЦ ПО ТЕХНОЛОГИИ NEP-ART, СПОСОБ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ И СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ПЫЛИ И РТУТИ

**Инженер Артур Мерхут; Д-р инж. Матеуш Тымошук
FPM S. A., Польша**

NEP-ART - технология удаления золы

Технология удаления золы NEP-ART, является уникальным решением для улучшения работы мельницы. Предотвращает проблемы, которые сопровождают помол и сжигание угля, и устраняет их до того, как они возникнут. Присоединенное устройство, также известное как Desander, удаляет различные примеси, содержащиеся в угле, которые обычно приводят к ошлакованию котлов и вызывают эрозию мельниц а также более удаленных вспомогательных установок. Удаление минералов, содержащих кремний и железо перед сжиганием, снижает затраты на техническое обслуживание и контроль выбросов, а также обеспечивает большую гибкость при смешивании топлива, что приводит к значительной экономии топливных затрат.

Характеристика продукта

- Спроектирован, как продукт для застройки в вертикальных (чашечно-роликовых и кольцево-шаровых) и горизонтальных шаровых мельницах. Действует как сопутствующий процесс, а не как процесс фрезерования.
- Использует процесс измельчения для выделения минеральных материалов из углеродного конгломерата.
- Выборочно удаляет плотные минералы, такие как кварц, ртуть, сера и

железо.

- Прочная конструкция, предназначенная для работы в среде, содержащей абразивные материалы.
- Отсутствие каких-либо движущихся деталей.
- Продукт можно отключить, не вызывая негативного влияния на процесс измельчения.
- Не требует дополнительных предметов для установки в и так уже ограниченном пространстве.

Принцип действия

HEP-ART представляет собой сепаратор, оборудованный двумя ситами:

- Первое сито улавливает комки, которые требуют дальнейшего измельчения.
- Второе сито отделяет минералы от угля.
- Уголь возвращается к измельчению, и собранные минералы удаляются.

Преимущества HEP-ART

- Ограничение технического обслуживания мельницы и ошлакования котла.
- Снижение перепада давления в мельнице из-за меньшего количества тяжелых минералов (например, кварца и пирита, циркулирующих в мельнице).
- Меньшее повреждение труб котла из-за меньшей эрозии, вызываемой кварцем, удаляемым по технологии HEP-ART.
- Сокращение выбросов мелких частиц.
- Большой поток энергии к котлу.
- Более низкая аварийность котловых труб из-за удаления кварца.
- Снижение выбросов серы и ртути.
- Уменьшение количества золы.
- Снижение мощности на собственные нужды мельницы.
- Более низкие потери на прокаливание котла (LOI– loss-on-ignition) – более 50%.
- Увеличенная производительность мельницы.
- Нет добавочного энергопотребления.
- Повышенная эластичность в диапазоне применяемого топлива.
- Увеличенное БТУ угля – улучшенная градация размельченного топлива, отсутствие в золе кремнезема.
- Нет движущихся деталей и энергопотребления.

- Возможность смешивать и использовать более дешевый уголь.

Внедрение технологии удаления золы НЕР приводит к значительному уменьшению эксплуатационных расходов на объекте. В приведенной ниже таблице показана минимальная экономия, которую можно достичь на типовой угольной электростанции мощностью 200 МВт, на основании затрат в 2018 году.

Таблица. Примерный расчет экономии затрат
(Блок 200 МВт, 6400 ч/год), млн злотых

- 5 мельниц МКМ-33
- Содержание золы в угле – 20%
- Объем угля – 800 000 тонн
- Удаление минеральной части – 80%

1	Снижение затрат на содержание котельной установки	1,0
2	Увеличение ресурса размольных элементов	0,4
3	Снижение затрат на десульфурацию дымовых газов	1,3
4	Снижение потребления электроэнергии мельничной установкой	0,7
5	Увеличение распорядительности блока и эффективности сжигания	2,0
6	Разница в цене продажи шлака по сравнению с отсепарированными минеральными частями	1,3
	Всего в год	6,7 млн злотых

Расчетный период возврата инвестиций <18 месяцев (средний возврат инвестиций в Австралии и США составляет 12 месяцев).

Остальные преимущества, это также:

1. Сокращение выбросов тяжелых металлов на 40 до 65% (ртуть, мышьяк, др.)
2. Установка соответствует требованиям заключения НДТ (наилучшие доступные технологии (BAT – Best Available Techniques)).
3. Возможность использования высокозольных и высокосернистых углей.
4. Повышение теплового КПД котла путем ограничения шлакообразования.
5. Увеличение максимальной производительности мельницы.
6. Повышение эффективности катализатора SCR (значительное уменьшение количества пыли).
7. Нет вмешательства в установку вне мельницы (компактные размеры устройства).
8. Значительное облегчение для систем удаления шлака и золы.

9. Отсепарированные минеральные части являются сухим продуктом (удобство транспортировки и хранения).
10. Минимальные эксплуатационные расходы (только вспомогательный воздух и привод конвейеров).
11. Высокая долговечность устройства «Десандер» (> 10 лет).
12. Ограничение образования SO_x из-за удаления серы.

УДК 662.74

**РОЗВИТОК ПІДХОДІВ ДО МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕТИКИ
ГЕТЕРОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ
ГОРІННЯ ТА ГАЗИФІКАЦІЇ ТВЕРДОГО ПАЛИВА**

Топал О. І., к.т.н.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

Моделювання промислових технологічних процесів спалювання та газифікації твердого палива, у т. ч. в сучасних математичних CFD-пакетах (Fluent, Ansys CFX тощо), потребує знання та належне використання експериментально отриманих констант, які характеризують кінетику (швидкість) процесів горіння та газифікації паливних частинок.

Отримання цих констант в рамках дослідів відбувається відповідно до прийнятої моделі та уявлень щодо механізму реагування, які пройшли певний тривалий етап розвитку. Існування значної кількості моделей, які використовуються для опису швидкості процесу термічної деструкції паливних частинок (горіння, газифікація тощо), зазвичай дещо ускладнюють її правильний вибір для подальшого використання (як для моделювання, так і при визначенні кінетичних констант за експериментальними даними). Крім того, в літературі здебільшого докладно надається опис окремих моделей, але їх порівняння та розвиток уявлень з часом викладені не в повній мірі.

У зв'язку із цим вважається доцільним більш докладно висвітлити етапи розвитку уявлень про механізм гетерогенних хімічних реакцій (газ-тверде тіло) та їх відповідний математичний опис, а також надати рекомендації про особливості застосування моделей як для обробки експериментальних даних, так і при моделюванні спалювання/газифікації.

Розвиток уявлень про механізм реагування паливних частинок з газом-реагентом пройшов такі етапи: на перших етапах – від розгляду частинки як

абсолютно непористої структури; подальших етапах, де внутрішня поверхня частинки враховувалось частково; на поточному етапі – де враховується вплив значної (порівняно із зовнішньою контурною поверхнею) розгалуженої поверхні пор (їх форми тощо) частинки на швидкість реагування.

На основі розвитку цих уявлень були сформовані базові підходи до опису механізму та швидкості реагування паливних частинок. Типовими представниками моделей, які відображають даний розвиток теорії гетерогенної взаємодії газ-тверде тіло, стали такі:

- 1) Для абсолютно непористої частинки:
 - 1.1 модель нереагуючого ядра, що стискається (shrinking core models);
 - 1.2 плівкові моделі (single film model та double film model) тощо.
- 2) Частинка, де наявність порового простору враховується через ефективні коефіцієнти (дифузії, коефіцієнту використання поверхні тощо):
 - 2.1 прогресуючої конверсії (progressive conversion) тощо.
- 3) Моделі, де паливна частинка розглядається як така, що має порову структуру. Останні моделі, в свою чергу, поділяються на дві великі підгрупи:
 - 3.1 моделі, де опис внутрішньої структури частинки базується на моделі однієї пори (single pore model) чи їх комбінаціях;
 - 3.2 моделі, де внутрішня структура частинки описується як сукупність випадково розподілених в об'ємі пор (random pore model).

Крім того, у групі 3 існують ще й моделі на основі так званої теорії перколяції (не набули широкого поширення).

Особливості зазначених математичних моделей для опису гетерогенної взаємодії типу газ-тверде тіло наведені нижче.

1. Абсолютно непориста частинка. 1.1 Модель нереагуючого ядра, що стискається (shrinking core models). Ця модель є найбільш поширеною та вживаною як при моделюванні термічних процесів, так і при отриманні експериментальних даних. Основні припущення моделі: реагування відбувається лише на зовнішній поверхні паливної частинки (для сфери це $4\pi r^2$). Частинка розглядається абсолютно непроникною для газу-реагенту (окислювача). Отже по ходу вигорання поступово зменшується радіус частинки, а густина залишається незмінною. Проста математична форма запису такої моделі:

$$(1/S) (dm/dt) = k_0 \exp(-E/RT) C_s$$

де $S=4\pi r^2$ – зовнішня поверхня сферичної частинки, m – маса частинки; t – час; k_0 – передекспоненційний множник; E – енергія активації, $R=8,31$ Дж/(моль К);

T – температура поверхні, C – концентрація газу-реагенту на поверхні.

Модель дозволяє легко знайти всі параметри конверсії її з часом у явному вигляді, у т. ч. ступінь конверсії $X=(m_0-m)/m_0$, де m_0 , m початкова та поточна маса частинки відповідно; зміну діаметру частинки (у часі та по ходу конверсії) тощо.

Застосування моделі для прогнозування вигорання/газифікації чи при отриманні констант із експерименту є прийнятним, коли параметри процесу (чи фактичної паливної частинки) найбільш адекватно відповідають закладеним припущенням моделі та умовам проведення досліду, який має відбуватись у кінетичній області. Наприклад, для визначення констант швидкості вигорання коксів антрацитів. У поєднанні із умовами масопереносу модель може поширюватись на область високих температур. У цьому випадку розрізняють вигорання у 1) кінетичній області, 2) проміжній та 3) дифузійній, які одна від одної відрізняються по співвідношенню коефіцієнтів хімічної реакції та дифузійного масообміну. При цьому не слід вживати терміни внутрікінетичного, внутрідифузійного чи зовнішньодифузійного режимів реагування, оскільки вони не закладені навіть у модельних припущеннях.

Водночас, для багатьох видів твердого палива (кам'яне вугілля, буре вугілля, торф, кокси матеріалів з біомаси тощо) у низькотемпературній області доступною є вся внутрішня поверхня частинки, яка у $10-10^4$ разів перевищує зовнішню. Останнє призводить до значних розбіжностей при порівнянні передекспоненційних множників k_0 константи швидкості реакцій, отриманих різними дослідниками, що слід брати до уваги при використанні цих констант.

1.2 Плівкові моделі (single film model та double film model). Плівкові моделі можна розглядати як подальший розвиток моделей нереагуючого ядра, що стискається. Основне припущення моделі залишилось незмінним: паливна частинка залишається абсолютно непроникною для газів реагентів. Основна відмінність моделей: вважається, що суттєві градієнти концентрацій продуктів реакції, окислювача тощо та температури відбуваються у тонкому шарі, що оточує частинку. Ці моделі знайшли свій розвиток як у закордонних дослідників, так і вітчизняних: ретельно засади плівкових моделей розглянуті у роботах Померанцева «Основы практической теории горения», введені поняття «горящий погранслои, негорящий погранслои, двойной горящий погранслои» тощо, які згодом увійшли до низки розрахункових методик та ГОСТів.

Математичний опис процесів в рамках плівкових моделей зазвичай досить громіздкий. Він фактично непридатний для обробки експериментальних даних.

Вирази для швидкості вигорання після низки обґрунтованих спрощень членів рівняння фактично приводяться до вигляду попередньої моделі нереагуючого ядра, що стискається.

При застосуванні цих моделей для розрахунків на сучасній комп'ютерній техніці (при моделюванні) не виникає труднощів, хоча вирази для швидкостей реагування громіздкі та їх аналіз ускладнений. Для отримання констант на основі експериментальних даних вони практично непридатні.

2. Частинка, де наявність порового простору враховується через ефективні коефіцієнти. 2.1 Моделі прогресуючої конверсії (progressive conversion). Подальшим розвитком уявлень про механізм реагування паливних частинок з газами-реагентами стала спроба врахування значної внутрішньої поверхні частинки в рамках моделей прогресуючої конверсії. В припущеннях моделі розглядається лише внутрішнє реагування. Розв'язок рівнянь моделі дає змогу отримати залежність концентрації газу-реагенту (наприклад, кисню) уздовж радіусу частинки для певних умов (температура тощо) та, якщо модель нестационарна, у часі. Суттєвих припущень щодо структури порового простору частинки немає: особливості масообміну всередині частинки враховуються комплексним коефіцієнтом дифузії газів, який передбачає кнудсенівську та амбіполярну дифузію, а також емпіричним параметром гілкуватості (рос. «извилистости») пор.

При моделюванні внутріпорового реагування зазвичай розглядається лише дифузія газу уздовж радіусу (рештою членів дифрівняння та лапласіана нехтують, спрощуючи його до однорідного). Для відокремлення характерних областей реагування вводяться різні параметри: найуживаніший – різні модифікації модуля Тіле. Відповідно до прийнятих кількісних значень модуля виділяють 1) внутрішньокінетичну (intrinsic kinetic controlled regime); 2) внутрішньодифузійну (diffusion control regime) або реагування, обмежене дифузією в порах; 3) зовнішньодифузійну область реагування, яка за змістом близька до дифузійного реагування в shrinking core-моделях.

Застосування моделей доцільне при моделюванні низькотемпературних процесів, наприклад, спалювання у киплячому шарі тощо. При отриманні констант з експерименту для частинок, які характеризуються розвинутою структурою пор, видається доцільним використовувати значення питомої поверхні (m^2/kg) при обчисленні констант швидкостей реакцій.

3. Частинка як поровий масив. 3.1 Моделі однієї пори (single pore model). Для врахування внутрішньої структури пор частинки розробляється

низка моделей, в яких увага концентрується на моделюванні реакцій в межах поодинокі пори. Результати моделювання в подальшому узагальнюються на всю частинку. Моделі містять багато припущень щодо форми пор, характеру масопереносу в них тощо, які відповідно описуються низкою суто емпіричних параметрів. На жаль, оцінити достовірність цих припущень та кількісної оцінки коефіцієнтів на макрорівні частинки, а тим більше, під час експерименту видається надзвичайно складним завданням. Наразі, поширеними та відносно доступними є методи порометрії, які дають змогу оцінити питому поверхню пор для певного діапазону їх діаметрів. Детальна та загально визнана модель структури пор викопних палив, видається, ще не створена.

Застосування моделей поодиноких пор видається доцільним при моделюванні термохімічних процесів, де властивості пор частинок задаються штучно (заздалегідь відомі): наприклад, при моделюванні роботи штучно створених каталізаторів (їх основ), в процесах їх регенерації тощо.

3.2 Моделі випадково розподілених пор в об'ємі (Random Pore Model).

Одночасно для врахування внутрішнього об'єму пор були розроблені та досить широко вживаються так звані моделі випадково розподілених пор. Основні припущення моделей: пори певного виду (циліндричні, сферичні тощо) рівномірно розподілені в об'ємі частинки; під час конверсії паливної частинки відбувається поступове зростання пор, потім – початок перетинання, яке характеризується максимумом доступної внутрішньої поверхні; та у подальшому – перекривання пор, яке характеризується зменшенням доступної внутрішньої поверхні й відповідним зменшенням швидкості реакції.

На відміну від *shrinking-core*-моделей, вказані моделі дозволяють пояснити наявність максимуму на залежностях швидкості реагування від ступеня конверсії паливної частинки. Досить поширеною в зазначеній групі є RPM-модель дослідника Bhatia. Модель не є надлишково параметризованою, для опису внутрішньої структури використовують лише один параметр, який можна отримати шляхом вимірів питомої поверхні досліджуваної частинки. Граничні випадки моделі (в залежності від параметра структури) дозволяють узагальнити як режим реагування обмежений дифузією в порах, так і режими, близькі до внутрішньодифузійної та дифузійної областей. Математичний опис швидкості взаємодії теж доволі простий, що дозволяє його використовувати в більш складних математичних моделях.

Застосування RPM-моделей вважається доцільним для «тонких» досліджень кінетики взаємодії паливних частинок з газами реагентами, де

отримуються залежності швидкості реагування від ступеня конверсії зразка. Крім того, моделі Bhatia використовувались при моделюванні росту пор при зв'язуванні оксидів сірки вапняком, тобто при зростанні пор у вигляді твердого матеріалу (а не порожнини) та показали прийнятне трактування експериментальних даних.

На підставі викладеного вважається, що розробка та вдосконалення математичних моделей, які використовуються для опису швидкостей реагування паливних частинок з газами реагентами є актуальним завданням; використання наявних моделей для прогнозування технологічних термічних процесів потребує належний вибір як моделі, так і констант реагування; отримання кінетичних констант реагування в експериментах потребує розуміння ключових припущень моделей та можливостей подальшого застосування отриманих констант.

УДК 621.31

**РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ДИСТАНЦІЙНОГО ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ
ДЛЯ ОБЛІКУ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ (ГАЗУ)**

Любарець М. І., Топал О. І., к.т.н.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

Енергетична стратегія України на період до 2035 р., галузеві нормативні документи, а також довгострокові плани крупних вітчизняних енергокомпаній вважають необхідним розвиток та вдосконалення засобів з обліку енергоресурсів, як основи їхнього раціонального споживання та впровадження заходів з енергозбереження. Підґрунтям цих заходів є створення та реалізація сучасних засобів дистанційного передавання даних (ЗДПД) у реальному часі, як частини систем smart metering та впровадження цифрової економіки в Україні. Подібні системи для обліку споживання електроенергії, природного газу, води тощо широко впроваджуються в країнах ЄС, вдосконалюючи систему обліку та прогнозування споживання енергоресурсів.

Широке впровадження обліку енергоресурсів на основі інтелектуальних систем (smart metering) можливе лише шляхом створення та розвитку належної розвинутої вимірювальної інфраструктури (PBI або advanced measuring infrastructure), яка об'єднує у собі апаратно-програмні засоби (лічильники,

ЗДПД, базові станції / концентратори / шлюзи; мережі стільникового зв'язку чи/та новостворені радіомережі; комп'ютерні мережі; програмні платформи тощо) та відповідні засади функціонування її підсистем (регламенти; протоколи телеметрії, протоколи прикладного рівня обробки даних; стандарти прикладного, каналного та фізичного доступу тощо).

До базових складових елементів РВІ, призначеної для обліку газу у побутових споживачів на основі інтелектуальних систем обліку, входять:

- газові лічильники;
- засоби дистанційного передавання даних (спеціалізовані модеми), які приєднуються до газових лічильників та/або смарт-лічильники із вбудованими ЗДПД;
- радіомережі різних типів (зокрема, стільникового зв'язку) чи/та інші мережі для дистанційного передавання даних;
- внутрішні мереж операторів зв'язку (стільникового, LoRa WAN тощо);
- мережі загального Інтернет доступу, зокрема на основі LP WAN підходів;
- програмні Інтернет платформи (переважно хмарні Cloud IoT-платформи) для приєднання ЗДПД та безпосереднього обліку спожитих енергоресурсів (газу);
- білінгові системи для фінансового обліку;
- функціональні протоколи різних рівнів: фізичного, каналного (стандарти радіозв'язку – GSM/GPRS, NB IoT, LoRa WAN інші), транспортного, прикладного (телеметрії (DLMS/COSEM) та протоколів обробки масових запитів (MQTT, CoAP тощо)) тощо.

Слід зауважити, що на першому етапі роботи основними завданнями було створення прототипів ЗДПД для приєднання до побутових лічильників газу, відпрацювання можливості передавання даних в IP-мережу для подальшої обробки даних на програмних платформах.

Другий етап створення РВІ передбачає відпрацювання програмних методів роботи ЗДПД з урахуванням прийнятих протоколів телеметрії (до прикладу, DLMS/COSEM) та протоколів масової обробки запитів (до прикладу, MQTT, COAP інших).

Кінцевий етап – це розробка серверної частини (back-end) платформи приймання даних, налагодження та відпрацювання її роботи як єдиного діагностично-вимірювального комплексу.

Дистанційне передавання даних телеметрії може відбуватись різними способами:

- 1) шляхом формування та передавання коротких повідомлень, які містять дані телеметрії;
- 2) шляхом формування Інтернет запитів з боку ЗДПД до серверної платформи з подальшим передаванням у цих запитах (GET, POST тощо) даних телеметрії.

Надзвичайно перспективними до впровадження видаються методи передавання даних від ЗДПД до внутрішньої мережі операторів стільникового зв'язку (чи іншої подібної радіомережі) з подальшим передаванням даних у розгалужену IP-мережу Інтернет провайдерів (Інтернет мережу загального доступу) та серверних платформ (Cloud-based platform). На даний час такий підхід є найбільш поширеним у світі.

В останньому випадку ЗДПД формує запит на обслуговування до базової станції (концентратору) та впродовж короткотривалого інтервалу часу передає накопичені дані телеметрії. Після сеансу зв'язку ЗДПД переходить до енергоощадного режиму до наступного сеансу. За таким принципом працюють значна частина технологій телеметрії для побутових споживачів у ЄС.

Автоматизований облік обсягів споживання природного газу у побутових споживачів можливо лише за умови наявності в лічильниках газу (переважно типів G1.6, G2.5, G4) спеціалізованих роз'ємів (низькочастотний вихід) для приєднання. У більшості газових лічильників, встановлених в Україні, імпульс, який формується за допомогою магніту на обертовому колесі механічного суматора лічильнику, є пропорційним обсягу спожитого газу та у подальшому використовується для замикання герконів, встановлених у ЗДПД. Отже, завданням ЗДПД щодо обліку споживання газу є обробка таких імпульсів електронною схемою пристрою ЗДПД та подальше передавання інформації (щодо обсягу спожитого газу; ідентифікатора лічильника тощо) до серверної частини платформи облгазу, відповідального за облік енергоресурсів.

У зв'язку з цим в ІВЕ НАН України в рамках Цільової програми наукових досліджень НАН України «Напівпровідникові матеріали, технології і датчики для технічних систем діагностики, контролю та управління», проводиться розробка апаратних засобів (ЗДПД) та програмного забезпечення для обліку споживання природного газу побутовими споживачами.

На даний час в ІВЕ розроблені макети ЗДПД-пристроїв (модемів) на основі мікропроцесорної техніки та відпрацьовується програмне забезпечення (мікропрограми), яке контролює передавання даних контролерами передавача.

Основу розроблених принципів електричних схем ЗДПД складають: 1) мікропроцесор та 2) модем, який перебуває під його управлінням, а також

допоміжні елементи (рис. 1).

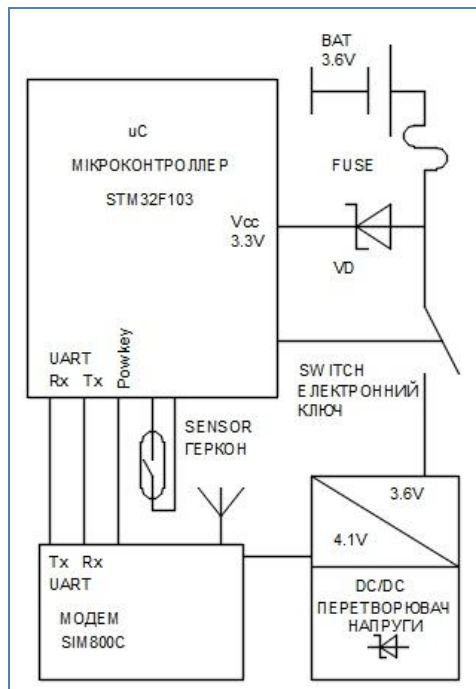


Рис. 1 – Блок-схема ЗДПД, розроблених для тестування клієнт-серверного підходу передавання даних телеметрії

Управління модемним модулем здійснюється за допомогою AT-команд. Принципова схема розробленого прототипу містить такі основні елементи: елемент живлення – БАТ 3,6 В Li-тієва батарея великої ємності для довготривалої роботи (в макеті батарею імітує блок живлення 3,6 В); FUSE – запобіжник; SIM800C – GSM/GPRS модемний модуль; DC/DC – перетворювач 3,6 В в 4,1 В, які необхідні для функціонування SIM800C (потужність мінімум 8,5 Вт); SWITCH – електронний ключ на р-канальному MOSFET-транзисторі для вимикання одночасно DC/DC та відповідно SIM800C; uC – мікроконтролер STM32F103 на наступному етапі буде замінено на STM32L1xx, який живиться значно меншим струмом; VD – діод Шоткі для електричної розв'язки та одночасно доведення напруги живлення мікроконтролера до необхідних 3,3V.

На даний час система ЗДПД опрацьована та відбувається вдосконалення програмного коду мікроконтролера.

УДК 662.6

**РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАМІЩЕННЯ
АНТРАЦИТУ ГАЗОВИМ ВУГІЛЛЯМ ТА ЇХ НАСЛІДКИ ДЛЯ
ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ**

Чернявський М. В., к.т.н.; Дунаєвська Н. І., к.т.н.

Інститут вугільних енерготехнологій (ІВЕ) НАН України

Україна – одна з провідних вугільних держав світу. Вугільні електростанції є одним з фундаментів енергетичної безпеки держави. Пилувугільні енергоблоки ТЕС є основним інструментом регулювання графіку енергоспоживання.

В нашій країні, яка займає третє місце в світі по антрацитових покладах, антрацитові котлоагрегати склали більше половини генеруючих потужностей теплових електростанцій. Тому, коли всі антрацитові шахти залишилися на тимчасово окупованій території Донбасу, більше ніж половина потужностей нашої теплової енергетики залишилась без палива. Натомість у Західному Донбасі та у Львівсько-Волинському басейні видобуток вугілля газової групи продовжувався і навіть нарощувався. Це зробило питання розроблення і впровадження технологій часткового або повного заміщення антрациту газовим вугіллям на ТЕС і ТЕЦ конче актуальним.

ІВЕ НАН України, базуючись на результатах оригінальних досліджень з визначення кінетичних характеристик піролізу та горіння вугілля різного ступеню метаморфізму і біомаси, з удосконалення методів розрахунку динаміки вигорання палив і паливних сумішей в умовах пилувугільного факелу, методів розрахунку критерію схильності вугільного пилу до самозаймання та вибуху, методів виготовлення однорідних паливних сумішей із заданими характеристиками, протягом 2014–2019 років в кризових умовах припинення поставок антрациту з Донбасу розробив та впровадив низку розробок, не просто практично цінних, а й критично важливих для теплової енергетики України. Серед них можна виділити такі напрямки.

Технологічні рішення зі спалювання імпортованих палив з непроектованими характеристиками, в тому числі - пісного вугілля з ПАР з тугоплавкою золюю та низькою калорійністю на Трипільській та Зміївській ТЕС, кузнечького пісного вугілля з тугоплавкою золюю та сибірського антрациту з низьким виходом летких речовин на Дарницькій, Чернігівській, Сумській ТЕЦ. На Слов'янській ТЕС, спроектованій виключно для використання антрациту з виходом летких

речовин менше ніж 8%, впроваджені технологічні рішення, які дозволили усунути випадки самозаймання та вибухів пилу з виходом летких речовин до 18%, забезпечити безпечне пилоприготування і спалювання пісного вугілля.

Технологічні рішення зі спалювання вугільних сумішей, в тому числі організація спалювання на існуючих котлоагрегатах суміші антрациту з 30–35% вітчизняного газового вугілля (0,5 т газового вугілля на 1 т антрациту) з характеристиками, як у пісного вугілля. У 2016 р. на Зміївській ТЕС було спалено 1 млн т такої суміші, що дало змогу додатково використати понад 300 тис. т вітчизняного газового вугілля, зменшити механічний недопал, розширити діапазон регулювання навантаження енергоблоків. У 2018 р. суміш використовувалась як основне паливо на Криворізькій ТЕС. На Слов'янській ТЕС у 2017–2019 роках було організоване безпечне та ефективне пилоприготування і спалювання сумішей антрациту з відходами вуглезбагачення, з газовим вугілля та нафтовим коксом. Для нормативного забезпечення використання сумішей було внесене доповнення в національний стандарт з якості вугілля для пиловидного спалювання та в нову редакцію "Правил технічної експлуатації електростанцій".

Переведення антрацитових котлоагрегатів на спалювання газового вугілля з максимальним використанням існуючого обладнання. У 2017 р. в стислі строки розроблено і впроваджено на Миронівській ТЕС технологію переведення двох антрацитових котлоагрегатів на газове вугілля без зміни складу обладнання, за рахунок лише режимних заходів. На Трипільській ТЕС переведені на газове вугілля два антрацитові енергоблоки потужністю по 300 МВт, економія коштів завдяки оригінальним технічним рішенням склала 90,7 млн грн. Зокрема, застосування пилоподачі високої концентрації під розрідженням дало змогу замість заміни пальників обмежитись їх модернізацією, вперше в світовій практиці було запропоновано і розрахунково обгрунтовано схему зі скиданням відпрацьованого запиленого сушильного агенту до існуючих скидних пальників, яка суттєво спрощує регулювання витрат пилу та повітря в основні пальники при зміні навантаження котла. На реконструйованих блоках викиди оксидів азоту порівняно зі спалюванням антрациту зменшились на 10–25%, економічний ефект при експлуатації енергоблоку №4 у 2018 році за рахунок покращення показників спалювання склав 372,3 млн грн.

Переведення антрацитових котлоагрегатів ТЕС на спалювання газового вугілля здійснювалось не лише за участі ІВЕ НАН України. На цей час сумарна

паропродуктивність переведених на газове вугілля котлів сягнула 5640 т/год., до кінця цього року вона досягне 6920 т/год. (табл. 1). Це потребує збільшення поставок газового вугілля на ТЕС у 2019 році на 4,4 млн т, у 2020 році – майже на 5,5 млн т. Якщо врахувати, що загальне надходження газового вугілля вітчизняного видобутку на ТЕС і ТЕЦ у 2017 році, коли антрацитові котли ще не були переведені на газове вугілля, склало приблизно 19 млн т, це збільшення видається доволі високим – на 23% і 29%, відповідно.

Таблиця 1 – Результати переведення антрацитових котлоагрегатів ТЕС на спалювання газового вугілля

ТЕС	Котел	Паро-продуктивність, т/год.	Річна витрата палива, тис. т	Технічні рішення	Генпідрядник
Станом на 01.07.2019					
Зміївська	2хТП-100А	2х640	1008	ХЦКБ "Енергопрогрес"	ТОВ "Котло-турбопром"
Придніпровська	4хТП-90	4х500	1575		
Трипільська	2х ТПП-210А	2х950	1496	ІВЕ НАН України	ТОВ «СТМ-Енерго»
Миронівська	2х ТП-230	2х230	362		ТОВ "Електро-наладка"
Додатково станом на 01.01.2020 (прогноз)					
Зміївська	2хТП-100А	2х640	1008	ХЦКБ "Енергопрогрес"	ТОВ "Котло-турбопром"
Всього		6920	5450		

*При 7000 год. роботи на рік з середнім навантаженням 75% від номінального, при калорійності вугілля 5200 ккал/кг.

Хоча вітчизняна вугільна промисловість має відповідні резерви нарощування видобутку газового вугілля, використання цих резервів можливе лише за рахунок відповідних капіталовкладень у вугільну галузь. На жаль, переведення антрацитових котлів на спалювання газового вугілля не супроводжувалось належним збільшенням фінансування вугільної галузі, тому збільшення видобутку газового вугілля в цьому році відчутно відстало від збільшення потреби в ньому на ТЕС. Це стало хоча не єдиною, але одною з основних причин спустошення вугільних складів ТЕС наприкінці серпня 2019 року. На наш погляд, для приведення у відповідність попиту і виробництва газового вугілля необхідні такі першочергові кроки, як реструктуризація боргів та відновлення енергопостачання державних шахт, удосконалення ринку електроенергії зі збільшенням частки регульовального

відпуску в тарифах ТЕС, тимчасова дотація для покриття різниці ціни та собівартості видобутку, а в перспективі – приватизація державних вугільних підприємств зі зменшенням собівартості виробництва вугільної продукції газової групи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Чернявський М. В., Дунаєвська Н. І., Провалов О. Ю., Мірошніченко Є. С. Наукові основи та технології заміщення антрациту на теплових електростанціях // 14-а Міжнар. научн.-практ. конф. «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку»: Зб. наук. праць. – Київ: ІВЕ НАН України, 2018. – С. 154–163.
2. Чернявський М. В., Моїсеєнко О. В., Монастирєва Т. М. Історія і перспективи використання вугілля на ТЕС України з огляду на мету скорочення викидів парникових газів // Новини енергетики. – 2017, №12. – С. 17–21.

УДК 621.311

ШАХТА ЯК ОБ'ЄКТ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В ПОСТ-ВУГІЛЬНІЙ ЕРІ

Вольчин І. А., д.т.н.; Гапонич Л. С., к.т.н.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ

Вугільні шахти Донбасу експлуатуються більше 300 років. Процес закриття вугільних шахт продовжується протягом усієї історії незалежної України. Хоча запаси вугілля групи А+В в Україні становлять більше 17 млрд. т, багато діючих шахт через виснаження вугільних пластів буде закрито. Великою проблемою є той факт, що часто вугільні шахти є основним місцем роботи працездатного населення маленьких містечок та селищ. Щоб не викликати значні міграційні потоки після закриття шахт, потрібно знаходити рішення з пошуку робочих місць шляхом перекваліфікації не тільки персоналу шахт, але й перепрофілювання самого вугледобувного підприємства.

Вугільна шахта представляє собою великий енергетичний об'єкт стосовно споживання електроенергії. Електрична потужність, яка споживається усіма механізмами однієї шахти, коливається в межах від 7 до 30 МВт. Наприклад, у 1991 році на вугільну промисловість України припадало більше 20% всієї спожитої електроенергії. Основні затрати електроенергії пов'язані з

необхідністю постійного відкачування підземних шахтних вод, живлення підземних та наземних електричних механізмів і транспорту, живлення компресорів тощо.

Після закриття шахти проблема відкачування шахтних вод залишається, а місцевій владі треба знаходити джерела фінансування такої діяльності. Оптимальним рішенням було б перетворення шахти в об'єкт різних видів відновлювальної енергетики, оскільки на шахту заходить потужна лінія електропередач.

Наявність великої кількості води в шахті та кваліфікованого шахтарського персоналу робить перспективною уставку гідроаккумулятивної енергетики, коли на різних підземних горизонтах шахти створюються водонепроникні сховища води, в нічні години вода закачується в верхнє сховище, а в години пік або для відкачування шахтних вод вона направляється вертикально вниз до нижнього сховища через генератор електроенергії.

Аналогічним може бути проект стиснення повітря в час нічного провалу з подальшим його розширенням в газовій турбіні в часи максимальної потреби в електроенергії.

Наявність великої наземної площі шахти робить перспективним розміщення на ній сонячних панелей та/або вітряних генераторів.

Шахтна котельня може бути використана для термічної утилізації твердих побутових відходів містечка чи селища за умови спорудження сучасних систем очищення димових газів.

УДК 662+504:553.499

ЕМІСІЯ РТУТІ НА ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ УКРАЇНИ

Вольчин І. А., д. т. н.; Гапонич Л. С., к. т. н.

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України

Ртуть є глобальною забруднюючою речовиною навколишнього середовища. Вона присутня у вугіллі всіх типів і вивільняється в навколишнє середовище при його термічній переробці. У 2015 році загальні викиди ртуті від вугільних теплових електростанцій (ТЕС) в атмосферу становили за різними оцінками від 255 до 346 т, на 9% більше ніж у 2010 році [1, 2]. Зниження викидів ртуті підприємствами енергетики, насамперед ТЕС, є і актуальною і обговорюваною в світі екологічною проблемою. В Україні ртуть та її сполуки

відносять до першого класу небезпеки (надзвичайно небезпечні) [3].

Головні фактори, що визначають об'єми викидів ртуті від теплової енергетики – це обсяги споживання вугілля, вміст у ньому ртуті, наявність на ТЕС очисних установок. Загальний об'єм видобутку вугілля в Україні у 2017 році склав 34,91 млн т, у 2018 році – 33,29 млн т, з них енергетичного вугілля – 28,1 млн т та 27,48 млн т, відповідно. В останні роки на українських ТЕС споживається від 22 до 30 млн т вугілля щорічно.

Вміст ртуті у викопному вугіллі (як кам'яному так і бурому) може змінюватися від 0,1 г/т до 300 г/т в залежності від геолого-геохімічних особливостей формування вугільних покладів [1–2, 4, 5]. Наприклад, для бітумінозного вугілля США це 0,01–3,3 г/т, Росії – 0,01–0,85 г/т, ПАР – 0,01–1,0 г/т [1, 2]. Вугілля південно-західних басейнів Китаю в середньому містить 0,55 г/т ртуті. Для українського вугілля Донецького басейну середній вміст ртуті становить 0,70 (0,08–8,55) г/т, Львівсько-Волинського басейну – 0,40 г/т [6–9].

Донбас є одним з найбільших гірничорудних районів всього світу, де за 200 років його промислової розробки видобуто понад 8 млрд т вугілля [9]. Микитівське рудне поле (м. Горлівка, Донецька область) є найзначнішим родовищем ртутних мінералів в Європі. Всього тут було видобуто понад 30 тис. т ртуті. Наприкінці минулого сторіччя видобуток ртуті було припинено, але залишилася екологічно порушена територія. Кількість ртуті в ґрунтах м. Горлівки досягає 15–20 г/т. У періоди тектонічної активізації ртуть надходила з мантії по глибинних розломах і утворювала не тільки ртутні родовища, а й розсіювалися в породах вугленосної товщі. Найбільш збагачені ртуттю вугілля Центральної зони Донбасу, де середній вміст ртуті складає 1,21 г/т [6–8]. При цьому вміст ртуті у деяких вугільних пластах Микитівського рудного поля сягає 30 г/т. У золі і шлаках ТЕС, що працюють на Донецькому вугіллі вміст ртуті складає від 0,17 до 1,55 г/т [68].

При збагаченні вугілля в концентрати, які направляються на спалювання, переходить від 25 до 70% ртуті, решта розсіюється в шламах і промпродукті [10]. Ртуть в концентратах представлена органічною та мікромінеральною піритною фракціями ($\text{Hg}^{\text{нір}}$).

Вміст ртуті в димових газах українських ТЕС, в першу чергу, визначається її високим вмістом у паливі. При згорянні вугілля ртуть переходить в димові гази у вигляді пари елементної ртуті Hg^0 , оксидів і солей Hg^{2+} , вільних або

хемосорбованих на частинках золи. Єдиний шлях зниження атмосферної емісії ртуті – її окислення за схемою: $\text{Hg}^0 \rightarrow \text{Hg}^{2+}$. Тільки Hg^{2+} може сорбуватися в зольному винесенні (на поверхні вуглецевих, силікатних і сульфатних фаз) та в скрубєрних гіпсах. Але при цьому, двовалентна ртуть є водорозчинною і, потрапляючи в природне середовище, може пройти через ряд хімічних перетворень і формувати високотоксичну метилртуть.

Розрахункові методи визначення викиду шкідливих речовин, що утворюються при спалюванні палива, базуються на використанні коефіцієнта викиду [11]. Річний викид ртуті можна розрахувати за формулою:

$$E_{\text{Hg}} = k_{\text{Hg}} \cdot B \cdot Q_i^r,$$

де E_{Hg} – валовий викид ртуті, кг;

k_{Hg} – коефіцієнт викиду ртуті, г/ГДж;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг;

B – витрата вугілля за рік, тис. т.

При спалюванні вугілля показник викиду ртуті k_{Hg} , г/ГДж, визначається за формулою [11]:

$$k_{\text{Hg}} = \frac{c_{\text{Hg}}}{Q_i^r} [a_{\text{вин}} f_{36} (1 - \eta_{3y}) (1 - f_r) + f_r (1 - \eta_{r3y})],$$

де c_{Hg} – масовий вміст ртуті у вугіллі, мг/кг;

Q_i^r – нижча робоча теплота згоряння вугілля, МДж/кг;

$a_{\text{вин}}$ – частка золи, яка виходить з котла у вигляді леткої золи;

f_{36} – коефіцієнт збагачення ртуті після золоуловлюваної установки становить 1;

f_r – частка ртуті, яка виходить у газоподібному вигляді, становить 0,9;

η_{3y} – ефективність золоуловлювальної установки;

η_{r3y} – ефективність уловлення газоподібної фракції ртуті в золоуловлювальній установці.

Частка золи $a_{\text{вин}}$, яка вносився з енергетичної установки у вигляді леткої золи для котлів з твердим шлаковидаленням становить 0,95, а для колів з рідким шлаковидаленням 0,7. Масовий вміст ртуті у вугіллі визначається з елементного аналізу палива, що спалюється в енергетичній установці. За відсутності можливості вимірювання вмісту важких металів у вугіллі, орієнтовні значення c_{Hg} визначають згідно з [11]: для донецьких антрацитів 0,28, пісного вугілля – 0,2, донецького газового та довгополуменевого вугілля – 0,14

та 0,16, відповідно, львівсько-волонського газового вугілля – 0,16. Дослідження показують, що ці значення можна використовувати як первинну оцінку.

Ефективність уловлювання твердих частинок золоуловлювальною установкою $\eta_{\text{зр}}$ залежить від типу очисного обладнання, встановленого на теплосилової установці, наприклад електростатичного фільтра, рукавного фільтра, мокрого скрубера, батарейного циклона тощо. Ефективність уловлювання газоподібної ртуті $\eta_{\text{гзу}}$ залежить від типу золоуловлювальної установки і наявності інших заходів очистки димових газів, і складає для електростатичних фільтрів 0,35 [11–13].

В таблиці наведено результати розрахунків показників викиду ртуті та валових викидів ртуті на українських ТЕС, що утворилися при спалюванні вугілля, для 2017 року.

ТЕС/ Генеруюча компанія	Марка вугілля	Витрата вугілля, млн т	$Q_{i_s}^r$, МДж/кг	k_{Hg} , г/ГДж	Валовий викид ртуті, кг
ДОНБАСЕНЕРГО		1,05			144,1
Слов'янська ТЕС	А	1,05	24,32	0,0058	144,1
ЦЕНТРЕНЕРГО		3,05			310,3
Вуглегірська ТЕС	Г, ДГ	1,94	21,86	0,0040	170,1
Трипільська ТЕС	А, П	0,46	21,73	0,0065	65,3
Зміївська ТЕС	А, П	0,65	22,48	0,0063	74,9
ДНПРОЕНЕРГО		4,76			482,5
Криворізька ТЕС	П	1,22	23,42	0,0050	143,1
Придніпровська ТЕС	А, П+Г	0,69	23,29	0,0060	89,2
Запорізька ТЕС	Г, ДГ	2,85	20,90	0,0042	250,2
ЗАХІДЕНЕРГО		8,39			737,7
Бурштинська ТЕС	Г, ДГ	4,44	21,06	0,0040	390,4
Добровірська ТЕС	Г, ДГ	1,35	21,15	0,0042	118,6
Ладизинська ТЕС	Г, ДГ	2,60	20,83	0,0042	228,7
СХІДЕНЕРГО		5,18			522,2
Курахівська ТЕС	Г, ДГ	3,92	18,07	0,0049	345,1
Луганська ТЕС	А, П	1,26	23,84	0,0059	177,1
ВСЬОГО		22,43			2196,8

Отримані значення показників викидів ртуті при спалюванні вугілля марок Г та ДГ корелюють зі значенням k_{Hg} при спалюванні газового вугілля 0,004 – 0,0047 г/ГДж наведеним в [11, 14].

Показник викиду ртуті при спалюванні природного газу становить $1 \cdot 10^{-4}$ г/ГДж. Валовий викид ртуті від спалювання газу на ТЕС України у 2017 році склав 0,64 кг.

Валові викиди ртуті на ТЕС України у 2017 році становили 2,2 тонни, що

складає 33,3% від викидів ртуті в атмосферне повітря України (6,6 тонн) згідно даних Державної служби статистики України. Питомі викиди ртуті на українських вугільних ТЕС у 2017 році були на рівні 0,1 г/т. Для порівняння, питомі викиди ртуті в світовій енергетиці – від 0,01 до 0,13 г/т використаного палива [1, 15].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. АМАР/UNEP, 2013. Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland. vi + 263 pp. – Режим доступу: <http://www.amap.no/documents/doc/Technical-Background-Report-for-the-Global-Mercury-Assessment-2013/848>.
2. АМАР/UN Environment, 2019. Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2018. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch, Geneva, Switzerland. viii + 426 pp including E-Annexes. – Режим доступу: <https://www.amap.no/documents/download/3396/inline>.
3. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309 «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел». – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06>.
4. Mashyanov N., Pogarev S., Panova E., Panichev N., Ryzhov V. Determination of mercury thermospecies in coal// Fuel 203 (2017) 973–980. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.085>.
5. Susan J. Tewalt, Harvey E. Belkin, John R. SanFilipo, Matthew D. Merrill, Curtis A. Palmer, Peter D. Warwick, Alexander W. Karlsen, Robert B. Finkelman, and Andy J. Park Chemical analyses in the World Coal Quality Inventory, version 1: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1196. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3133/ofr20101196>.
6. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Ртуть в углях – серьезная экологическая проблема // Биосфера. – 2009. – Т. 1, № 2. – С. 237-347.
7. Панов Б., Короткова Н., Саніна О. Ртутна небезпека донецького басейну//Мінералогічний збірник. – 2005. – № 55. – Вип. 1–2.– С. 189–193.
8. Panov B., Nikitenko O., Korotkova N., Sakhno S. Mercury in the coal of Donbas region // Mineralogical collection. – 2006, No. 56 (1–2).
9. Haponych L. Shendrik T., Mashyanov N., Pogarev S. Mercury emissions by

Ukrainian coal-fired thermal power stations //Збірка тез 1 Україно-Польського семінару «Improving the efficiency and environmental performance of the combustion, gasification and thermochemical conversion of solid fuels». – Київ – 2017. – С. 24–28.

10. Wichliński M., KobyłEcki R. Zbigniew B. The investigation of mercury contents in polish coal samples//Archives of environmental protection. – 2013. – Vol. 39 no. 2. – P. 141–150. – Режим доступу:
http://aep.czasopisma.pan.pl/images/data/aep/wydania/No_2_2013/11.pdf.
11. ГКД 34.02.305–2002. «Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від енергетичних установок. Методика визначення». К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2002. – 42 с.
12. Srivastava RK, Hutson N, Martin B, Princiotta F, Staudt J. Control of Mercury Emissions from Coal-Fired Electric Utility Boilers// Environ Sci Technol. 2006 Mar 1;40(5):1385-93. DOI: [10.1021/es062639u](https://doi.org/10.1021/es062639u).
13. US EPA. 2002. Control of Mercury Emissions from Coal-fired Electric Utility Boilers, Interim Report Including errata Data 3-21-02. EPA-600/R-01-109, National Risk Management Research Laboratory, Research Triangle Park, NC.
14. Zhang L., Zhuo Y., Chen L., Xu X., Chen C. Mercury emissions from six coal-fired power plants in China//Fuel Processing Technology. Volume 89, Issue 11, November 2008, Pages 1033-1040. – Режим доступу:
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.04.002>.
15. Final report mercury emissions from coal-fired power plants in Indonesia. Basel Convention Regional Centre For South East Asia/ Stockholm Convention Regional Centre Indonesia Jakarta, Indonesia. – 2017. – 94 p. – Режим доступу:
<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/25565/Final%20SSFA%20Report%20Indonesia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

УДК 662.6

НАУКОВІ ОСНОВИ ТА ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПЕРЕВЕДЕННЯ СЛОВ'ЯНСЬКОЇ ТЕС НА ГАЗОВЕ ВУГІЛЛЯ

Чернявський М. В., к.т.н.; Провалов О. Ю., к.т.н.

Інститут вугільних енерготехнологій (ІВЕ) НАН України

В умовах повного припинення поставок донецького антрацитів і введення додаткових торговельних санкцій з боку РФ актуальною стала задача

переведення котлоагрегату ТПП-200-1 енергоблоку №7 потужністю 800 МВт Слов'янської ТЕС на вітчизняне вугілля газової групи. Досвід такого переведення котлоагрегатів ТПП-210А, теж з напіввідкритими топками, на Трипільській ТЕС показав, що основним питанням при цьому є реконструкція пилосистем. Питання ускладнюється тим, що пилоприготування на Слов'янській ТЕС здійснюється на центральному пилозаводі з неventильованими млинами, розрахованому лише на антрацит з виходом летких речовин менше 8%. Схема пилозаводу не допускає застосування сушки вугілля димовими газами з пониженим вмістом кисню; отже, слід шукати інші способи зменшення ризику самозаймання вугільного пилу, базуючись насамперед на його фізико-хімічних властивостях і на особливостях процесу сушки.

До складу обладнання ППЦ входять три сушильно-розмельних системи (СРС) продуктивністю по 150 т/год., кожна з яких складається з сушильної установки і двох млинових установок (рис. 1). Сире вугілля стрічковим живильником подається в барабан парової панельної сушарки (ППС), де встановлені гріючі панелі, в які подається пара з тиском 4 кгс/см^2 і температурою 150–185 °С. У міжпанельному просторі вугілля контактує з гарячими поверхнями панелей і висушується, а пар всередині панелей конденсується і віддається в конденсаційний бак. Утворена в процесі сушіння вугілля пилопароповітряна суміш відсмоктується з барабана сушарки через циклони пилу вентилятором відсмоктування і направляється на повне очищення в електрофільтр. З ППС підсушене вугілля (вологістю до 3%) надходить в бункер сушонки, звідки по тічці подається в шахту елеватора. Ковшами елеватора паливо піднімається на позначку 29 м і зсипається в завантажувальний короб, звідки вугілля, розділене на два потоки ділильним шибером, самопливом надходить на два відцентрових механічних сепаратора, де відбувається поділ палива на тонку і грубу фракції. Готовий пил виноситься потоком повітря, створюваного виносним вентилятором, в циклони пилу, де відділяється і надходить до бункерів пилу. Великі частинки з сепараторів по тічках направляються в барабан кульового млина, де паливо розмелюється і досушується теплом куль і броні від вмісту вологи 3% до 1%. Продукт розмелювання надходить до шахти елеватора, де змішується з підсушеним вугіллям, що надходить з бункера сушарки, піднімається і зсипається в сепаратори. Далі рух палива відбувається по циклу, описаному раніше. Для запобігання запиленню передбачена слабка вентиляція млина з

відсмоктуванням пилоповітряної суміші млиновим вентилятором через циклони з видачею потоку на вхід і вихід сушарки і на циклони вентилятора відсмоктування сушарки, далі на електрофільтр. З електрофільтру очищене вологе повітря димосмоками викидається через трубу в атмосферу, а вловлений пил направляєтся в бункер пилу. Пил з бункерів надходить до пневмогвинтових насосів, підхоплюється стисненим повітрям з температурою 90 °С і по пилопроводах високої концентрації транспортується до бункерів пилу котла.

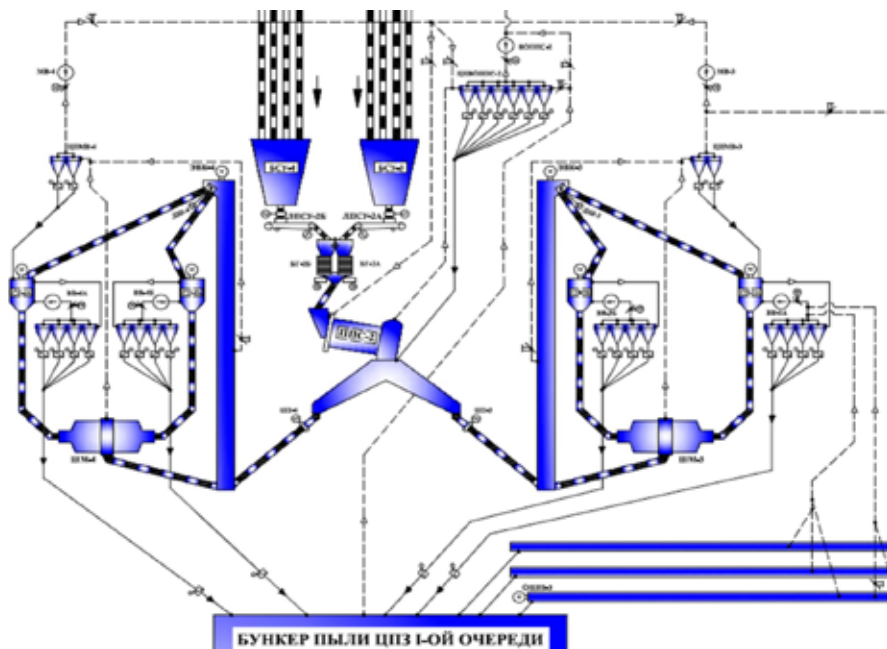


Рисунок 1 – Схема сушильно-розмельної системи

Аналіз наведеної схеми показує, що, на відміну від вентильованих пилосистем, єдиним чинником вибухо- і пожежобезпеки в ній є температура і відсутність пересушування пилу. Тепловиділення в сушарці можна регулювати за рахунок керування поверхневим тепловим напруженням панелей, яке залежить від тиску пари. Проте таке регулювання можливе лише для усереднених режимів роботи, воно не є настільки гнучким, щоб підтримувати постійну температуру сушонки при коливаннях витрати та/або вологи вугілля. Безпечні сушку та розмел газопого вугілля в існуючих СРС можна реалізувати лише за наявності чинника авторегулювання процесу з підтримкою рівня

температури не більше ніж 70 °С.

При пошуку такого чинника слід взяти до уваги, що прийняте у відомих методах розрахунку неvented пилосистем припущення про рівність температур підсушеного вугілля та вологого повітря, що відсмоктується з сушарки, є правомірним лише для випадку сушки та розмелу антрациту із залишковою вологою сушонки та пилу меншою ніж 1%. Насправді ж волога з капілярно-пористих матеріалів видаляється послідовно: поверхнева волога, капілярна волога в макропорах, так звана стикова волога, капілярна волога в мікропорах, волога полі- та мономолекулярної адсорбції (рис. 2). Перші три види води відповідають вологому, останні три – гігроскопічному стану матеріалу. Протягом більшої частини періоду сушки у вологому стані температура матеріалу залишається постійною і близькою до так званої «температури мокрого термометра». Це температура, яку приймає вологий матеріал в ненасиченому середовищі під час процесу випаровування фізично та хімічно незв'язаної води, вона є тим нижчою за температуру середовища, чим менший ступінь його насичення.

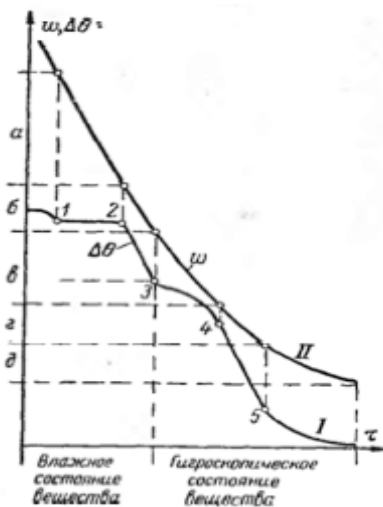


Рис. 2 – Схема кінетики послідовного випаровування води при сушінні капілярно-пористих матеріалів: I – термограма, II – крива сушки. Види зв'язку води: а – волога капілярного стану в макропорах, б – стикова волога, в – капілярна волога мікропор, г – волога полімолекулярної адсорбції, д – волога мономолекулярної адсорбції

Розрахунки показують, що основний механізм сушки газового вугілля в

ППС повинен базуватись на принципі недосушування вугілля до гігроскопічної вологи (за рахунок регулювання тепловиділення парових панелей шляхом зміни тиску пари). За цих умов температура сушонки буде дорівнювати температурі «мокрого термометра», яку за рахунок регулювання співвідношення між витратою вугілля та вентиляючого повітря можна утримувати на безпечному для газового вугілля рівні не більше 70 °С. При збалансованому процесі, коли волога сушонки більша за гігроскопічну, тепло мелючих тіл в млині витрачається на випаровування залишкової вологи і нагрів повітря, що вентилює млин, так що температура пилу не змінюється порівняно з температурою сушонки.

З цього випливає, що існуюче обладнання СРС придатне для використання газового вугілля за рахунок підтримки безпечних температур для сушонки і готового пилу за принципом "мокрого термометра". Для усунення ризику загоряння виносу в електрофільтрі можна рекомендувати замінити його рукавним фільтром, в якому відсутній ризик запалювання розрядом, а безпечну температуру в ньому можна утримувати присадкою холодного повітря.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Чернявський М.В. Вплив зольності, тонини розмелу та вмісту вологи вугільного пилу на схильність до самозаймання та вибуху // 14-а Міжнар. наук.-практ. конф. «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку»: Зб. наук. праць. – Київ: ІВЕ НАН України, 2018. – С. 194–198.
2. Назмеев Ю.Г., Мингалева Г.Р. Системы пылеподачи и пылеприготовления ТЭС: Справочное пособие. – М.: Изд. дом МЭИ, 2005. – 480 с.
3. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 320 с.

УДК 662.6

ДОСВІД ПИЛОПРИГОТУВАННЯ І СПАЛЮВАННЯ СУМІШЕЙ АНТРАЦИТУ З НАФТОВИМ КОКСОМ ТА ГАЗОВИМ ВУГІЛЛЯМ НА СЛОВ'ЯНСЬКІЙ ТЕС

**Провалов О. Ю., к.т.н.; Косячков О. В., к.т.н.; Росколупа А. І.
Інститут вугільних енерготехнологій (ІВЕ) НАН України**

Ця робота є продовженням досліджень, спрямованих на розширення паливної бази Слов'янської ТЕС в умовах припинення поставок донецького

антрациту.

Основним генеруючим обладнанням Слов'янської ТЕС є енергоблок №7 потужністю 800 МВт (котел ТПП-200-1 з напіввідкритою топкою і турбіна К-800-240-2). Електростанція оснащена центральним пілозаводом (ЦПЗ), особливість якого – унікальна схема з сушінням вугілля в парових панельних сушарках і невентильовані кульові барабанні млини. Проектне паливо – донецький антрацит з виходом летких речовин $V^{daf} \leq 8\%$. За конструкцією пальників, об'ємом топки, розподілом теплосприймаючих поверхонь і продуктивністю тягодуттєвого обладнання котел ТПП-200-1 здатний працювати на пилу як антрациту, так і пісного вугілля, так що обмеження по виходу летких речовин стосується головним чином ЦПЗ, де до 2017 року спроби спалювання суміші антрациту з пісним вугіллям з виходом летких речовин понад 8% супроводжувались випадками самозаймання вугільного пилу в сепараторах, бункерах та в електрофільтрі.

В [1, 2] на підставі результатів аналізу залежності схильності пилу газового вугілля до самозаймання та вибуху від вологості, крупності та температури пилу і за результатами випробувань було показано, що ризик самозаймання пилу суттєво зменшується при зниженні температури сушки в паровій панельній сушарці (ППС) до менше ніж 130 °С для зменшення ймовірності самозаймання та для запобігання пересушуванню палива, збільшенні вологи готового пилу до рівня $W^{пл} = 1,5-2,2\%$, погрубленні розмелу пилу до рівня $R_{90}=12-14\%$ для зменшення питомої поверхні і ефективного значення критерію вибухоздатності $K_r^{кр}$. Протягом випробувань у 2017–2018 рр. було здійснене успішне пілоприготування і спалювання сумішей антрациту з 30–80% пісного вугілля, з пісним вугіллям з виходом летких речовин до 15–16%, сумішей пісного вугілля з вуглецевміщуючим матеріалом золовідвалу ТЕС ($A^d=83,5\%$) та з сухими відходами збагачення вугілля марки ПС з відвалу шахти ім. Святої Матрони Московської ($A^d=64\%$, $V^{daf}=32,5\%$). За час випробувань випадків неконтрольованого розігріву пилу в сушильно-розмельній системі та в електрофільтрі (ЕФ) не спостерігалось. Це дозволило розширити паливну базу ТЕС та пройти зимовий сезон 2017–2018 рр. в умовах нестабільних поставок антрациту і пісного вугілля.

Згідно з Розпорядженням КМУ 532-р від 26.07.18 та листом Мінерговугілля 04/32-6445 від 10.08.18, для сталого функціонування Слов'янської ТЕС та накопичення палива перед осінньо-зимовим максимумом навантаження наприкінці 2018 року стала актуальною задача використання

вітчизняного вугілля газової групи та альтернативних низькорекційних палив, таких як нафтовий кокс, на енергоблоках Слов'янської ТЕС без зміни складу і режимів роботи обладнання, в тому числі ЦПЗ. На основі позитивного досвіду ІВЕ НАН України зі спалювання на антрацитових котлах Зміївської, Трипільської, Криворізької ТЕС сумішей антрацитового і газового вугілля з технологічними властивостями, що відповідають вугіллю марки П, було запропоновано застосувати таке технічне рішення і на Слов'янській ТЕС.

На прохання ПАТ «Донбасенерго» ІВЕ НАН України розробив «Програму першочергових заходів з розширення паливної бази Слов'янської ТЕС ПАТ «Донбасенерго» із залученням вітчизняного вугілля газової групи», яка була розглянута та погоджена на засіданні секції «Електроенергетика» НТР Міненерговугілля Протоколом від 18.09.2018 р. і включала такі основні етапи:

- розрахунок оптимального складу паливних сумішей з додаванням вітчизняного вугілля газової групи та/або нафтового коксу для забезпечення безпечного пилоприготування та ефективного спалювання з режимними умовами пилоприготування і спалювання як для суміші марок А і П та екологічних характеристик спалювання в межах існуючих дозволів на викиди шкідливих речовин для Слов'янської ТЕС;
- виготовлення пробних партій паливних сумішей з додаванням вітчизняного вугілля газової групи та/або нафтового коксу на складі Слов'янської ТЕС, опробування сумішей з доведенням їх належної однорідності та відповідності суміші марок А і П за наступними показниками: зольність, вологість, вихід летких речовин на сухий беззольний стан;
- випробувальне спалювання пробних партій паливних сумішей в котлоагрегатах ТПП-200-1 і ТП-230-2 Слов'янської ТЕС;
- організація довготривалого спалювання паливних сумішей в котлоагрегатах ТПП-200-1 і ТП-230-2 Слов'янської ТЕС.

Згідно з сертифікатом, виданим міжнародною інспекторською компанією SGS North America Inc., за технологічними показниками нафтовий кокс виробництва США є ідентичним малозольному антрацитовому вугіллю з виходом летких речовин до 10%, його спалювання у суміші з антрацитом не потребує внесення змін в наявну на електростанції технологічну схему пилоприготування та спалювання. Відмінністю нафтококсу є вміст сірки на робочу масу до 5,8%. Результати розрахунку показали, що при вмісті нафтококсу в паливній суміші з АШ не більше ніж 15% емісія сірчистого

ангідриду не перевищує 4438 мг/нм^3 , тобто, є меншою, ніж середнє для двох корпусів котла допустиме значення за чинним дозволом для Слов'янської ТЕС 4482 мг/нм^3 , тобто, спалювання такої суміші не погіршує існуючу екологічну ситуацію для Слов'янської ТЕС. В ході виконання випробувань в частині суміші антрациту з нафтовим коксом на існуючому обладнанні Слов'янської ТЕС було підтверджено, що суміш дійсно поводить себе як єдине однорідне паливо і не потребує конструктивних, технічних, технологічних змін в обладнанні ЦПЗ та блоку ст. №7. Виконані заміри підтвердили, що спалювання однорідної суміші антрациту з нафтовим коксом, складеної в розрахованій пропорції, не призводить до збільшення шкідливих викидів, в тому числі сірчистого ангідриду, понад рівні, установлені у діючих дозволах Слов'янської ТЕС на викиди і, таким чином, не призводить до погіршення стану навколишнього середовища.

При спалюванні суміші антрациту з газовим вугіллям були застосовані такі ж технологічні прийоми, як для суміші антрациту з пісним вугіллям. Частка газового вугілля в суміші була обмежена на рівні 30%, вихід летких речовин на суху беззольну масу – 16%. При випробуваннях на ЦПЗ було відзначено, що стандартне відхилення виходу летких речовин в точкових пробах пилу є значно меншим, ніж сирого вугілля на складі, що свідчить про додаткове перемішування суміші в ППС. Випадків самозаймання пилу на ЦПЗ не спостерігалось. При випробувальному спалюванні суміші було встановлено збільшення температури в районі льоток, полегшення витікання рідкого шлаку, зменшення горючих у виносі та рівня механічного недопау. Загалом, результати випробувань відкривають шлях для переведення Слов'янської ТЕС на газове вугілля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чернявський М.В. Вплив зольності, тинини розмелу та вмісту вологи вугільного пилу на схильність до самозаймання та вибуху // 14-а Міжнар. наук.-практ. конф. «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку»: Зб. наук. праць. – Київ: ІВЕ НАН України, 2018. – С. 194–198.
2. Провалов О.Ю., Косячков О.В., Чернявський М.В. Розробка і впровадження заходів з переведення центрального пилозаводу Слов'янської ТЕС і котлоагрегату ТПП-200-1 на пісне вугілля і на суміші антрациту з відходами збагачення кам'яного вугілля з виходом летких речовин сумішею до 14% // Там же. – С. 198–201.

УДК 662.6

**РОЗРОБКА І АПРОБАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ПЕРЕВЕДЕННЯ
КОТЛІВ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ З ВУГІЛЛЯ
НА ПАЛИВНУ БІОМАСУ (НА ПРИКЛАДІ КОТЛА "РАДІАНТ"
ПАРПРОДУКТИВНІСТЮ 20–24 Т/ГОД.)**

Мірошниченко Є. С., Росколупа А. І.

Інститут вугільних енерготехнологій (ІВЕ) НАН України

В роботі "Розробка технічних рішень з переведення котлів малої та середньої потужності з викопного палива на біомасу" цільової програми наукових досліджень НАН України "Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд" (Ресурс-2) поставлено за мету подовження терміну експлуатації твердопаливних котлів малої та середньої потужності та розширення їх паливної бази шляхом розробки технічних рішень з їх переведення на спалювання твердої паливної біомаси з максимальним використанням наявного обладнання і з урахуванням сучасних технологічних та екологічних вимог.

Тверде біопаливо є перспективним ресурсом для забезпечення котлів промислової енергетики за рахунок таких основних переваг:

- вкрай високою сучасною ціною природного газу порівняно з твердим паливом;
- значно кращими екологічними показниками твердої паливної біомаси у порівнянні зі спаленням вугілля;
- надання державою стимулюючих тарифів на тепло та електричну енергію, що вироблена з біомаси.

Паровий котел «Радіант» – вертикальний водотрубний, однобарабаний з природньою циркуляцією, виконаний у П-подібній компоновці з врівноваженою тягою. Спосіб спалення – у нерухомому шарі на механічній решітці прямого ходу. За первинною проектною схемою котел розрахований на спалення антрациту. З середини 70-х років минулого сторіччя ці котли переводились на спалення природного газу з демонтажем механічних решіток і збільшенням паропродуктивності від 20 до 24 т/год. Враховуючи наведені вище переваги біомаси та припинення поставок донецького антрациту, вирішувалась задача реконструкції чотирьох з п'яти котлів «Радіант» Хоростківського цукрового заводу з переведенням їх на спалювання основного палива – пелети лушпиння соняшника, резервного – газового львівсько-волинського вугілля.

Технології спалювання антрациту (первинне проектне паливо) та природного газу (сучасний стан котлів) відрізняються від технології спалювання пелет з лушпиння соняшника та газового вугілля. Основні відмінності полягають в розподілі повітряного дуття та в необхідному рівні підігріву повітря. Технологія спалювання антрациту передбачала підігрів повітря до 300–315°C для досягнення умов його запалення на решітці, для скорочення зони займання газового факелу теж застосовують підігріте повітря. Для спалювання пелет та газового вугілля на решітці прямого ходу високий підігрів повітря не рекомендований за умов запобігання налипанню шлаку на решітку, а також необхідності охолодження та захисту конструкцій від перегріву. Крім того, підвищення температури повітря при подачі його під решітку призвело б до значного подорожчання обладнання решітки із застосуванням жаростійких металів.

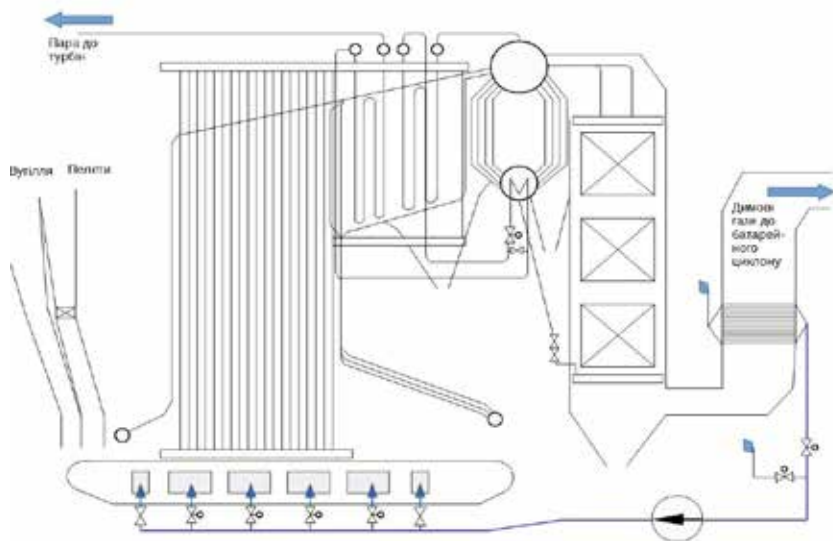
Ще одна відмінність – значно більша питома (на тонну умовного палива) витрата продуктів згоряння пелет, ніж вугілля та газу, що визначає більший винос теплоти з топки до конвективної шахти. Нарешті, на відміну від вугілля з температурою деформації золи понад 1100 °C, значний вміст оксидів лужних та лужноземельних металів у золі пелет визначає значно менший рівень температур деформації та ризик шлакування ширм, починаючи з температури топкових газів 800–850 °C. Щоправда, досвід польських компаній свідчить, що на відміну від спалювання у низькотемпературному вихорі та киплячому шарі, яке супроводжується щільними "смолянистими" відкладеннями золи на ширмах, золіві відкладення від спалювання пелет у щільному шарі з температурою шару понад 1200 °C є пухкими, нетривкими, легко руйнуються паровою обдувкою.

Вирішення проблем, що перелічені, вдалося досягти комбінацією наступних технологічних рішень:

- зменшення поверхні повітропідігрівника з 660 до 100 м², температури підігріву повітря – з 310 до 50–60°C;
- збільшення поверхні водяного економайзера з 260 до 610 м²;
- збільшення кількості секцій підрешіткового повітряного коробу з розподілом повітря, який дозволяє "розтягти" зону горіння пелет на 4–5 м активної довжини решітки та збільшити поверхню випромінювання шару;
- застосування сучасних механічних решіток прямого ходу виробництва заводу FPM (м. Мікулов, Польща);

- обладнання котла двома бункерами сирого палива – один для пелет, другий для газового вугілля, з можливістю незалежного регулювання витрати палива (передбачене почергове спалювання пелет і вугілля з абразивною очисткою золових відкладень від спалювання пелет золою вугілля);
- оснащення котла паровою обдувкою ширм, яка вмикається при збільшенні температури відхідних газів до 200 °С;
- встановлення високоефективного батарейного циклону з можливістю періодичного повернення уловленої золи на допалювання до топки.

Схему котла "Радіант" після реконструкції наведено на рисунку.



На цей час монтаж реконструйованих котлів завершено, тривають пуско-налагоджувальні роботи. Попередньо можна сказати, що мету реконструкції в цілому досягнуто, забезпечено паропродуктивність котла 20 т/год., температуру відхідних газів безпосередньо після обдувки ширм – 150 °С, перед обдувкою – не більше ніж 200 °С. Решітка не перегрівается, налипання шлаку на неї відсутнє. Слід підкреслити, що вказаний результат досягнуто з максимальним використанням наявного обладнання котлів.

Подальше налагодження спрямоване на зменшення вмісту горючих в золі-виносі, на збільшення інтервалу між обдувками ширм та на перевірку можливості розширення спектру твердого біопалива (пелети соломи, торф, деревні відходи, тощо).

**ВМІСТ СІРКИ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ ВУГІЛЛІ В ЗАЛЕЖНОСТІ
ВІД ФРАКЦІЙ ГУСТИНИ ТА РОЗМІРУ І ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ
ЙОГО ЗМЕНШЕННЯ ПРИ ЗБАГАЧЕННІ ВУГІЛЛЯ**

Чернявський М. В., к.т.н.; Дулієнко С. Г.; Монастирська Т. М.

Інститут вугільних енерготехнологій (ІВЕ) НАН України

Для неперевищення гранично встановленого рівня викидів сірчистого ангідриду на перехідний період до моменту будівництва сіркоочисного обладнання Національний план скорочення викидів (НПСВ) рекомендує використовувати вугілля з низьким вмістом сірки. Між тим, енергетичне вугілля з вітчизняних шахт, розташованих на контрольованій території, здебільшого відноситься до середньо- та високосірчистого.

Основна ідея досліджень полягає в тому, що сірка в вугіллі знаходиться у складі органічної, піритної та сульфатної. Два останні різновиди входять до складу мінеральних включень і значною мірою видаляються при збагаченні вугілля. Крім того, при збагаченні збільшується калорійність вугілля. Згідно з методикою розрахунку викидів [1], концентрація сірчистого ангідриду є зворотно пропорційною до питомого об'єму сухих димових газів, який є прямо пропорційним до калорійності вугілля Q_i^r . В роботі [2] показано, що концентрація сірчистого ангідриду в димових газах визначається величиною приведеної сірки $S^n = S^r/Q_i^r$, %-кг/Мкал. Таким чином, викиди при спалюванні концентрату є меншими, ніж при спалюванні рядового вугілля, завдяки двом чинникам: видалення мінеральної сірки і збільшення калорійності.

В роботі досліджено вміст сірки в рядовому вугіллі українських шахт по класах крупності і фракціях густини. Приклад одержаних результатів для вугілля шахти Степова ПАТ "Львіввугілля" наведений в таблиці. При обробці результатів слід врахувати певні особливості процесу збагачення:

- збагаченню для одержання енергетичного продукту піддають головним чином клас 0–13 мм, який попередньо виділяють сухим відсівом;
- при збагаченні відсадкою шламів фракції та клас 0–1 мм змиваються, згущуються у відстійнику або в гідроциклонах і після зневодження домішуються до концентрату фракції -1800 кг/м³ класу 1–13 мм.

Таким чином, для розрахунку виходу, зольності та вмісту сірки одержаного продукту слід брати фракції -1800 кг/м³ класів від 1–3 до 6–13 мм, шламів фракції класів від 1–3 до 6–13 мм та повністю класи 0–0,5 та 0,5–1 мм.

Приклад ілюструє, що навіть при незначному зменшенні вмісту сірки в продукті збагачення порівняно з рядовим вугіллям можна одержати суттєве зменшення викидів сірчистого ангідриду завдяки збільшенню калорійності.

Фракційний склад та вміст сірки по класах крупності і фракціях рядового вугілля ш. Степова

Густина фракції, кг/м ³	+50 мм					25–50 мм				
	Вихід, %		A ^d , %	Сірка	Леткі	Вихід, %		A ^d , %	Сірка	Леткі
	на клас	на ряд. вуг.				на клас	на ряд. вуг.			
-1500	13,39	0,15	10,9	2,0	37,3	37,25	5,13	8,6	2,1	38,9
1500–1800						3,20	0,44	30,8	8,3	36,3
+1800	84,82	0,95	88,2	3,3	80,3	58,02	7,99	87,5	2,7	81,6
Загалом	98,21	1,10	77,7	3,1	74,4	98,47	13,56	55,8	2,6	64,0
шлам	1,79	0,02	49,7	2,4	36,4	1,53	0,21	47,5	2,5	34,6
Всього	100,00	1,12	77,2	3,1	73,8	100,00	13,77	55,7	2,6	63,5

Густина фракції, кг/м ³	13–25 мм					6–13 мм				
	Вихід, %		A ^d , %	Сірка	Леткі	Вихід, %		A ^d , %	Сірка	Леткі
	на клас	на ряд.вуг.				на клас	на ряд.вуг.			
-1500	54,18	13,34	5,3	2,2	39,2	55,76	18,26	4,4	2,0	38,9
1500–1800	1,71	0,42	28,0	7,2	38,9	1,77	0,58	28,9	9,0	37,7
+1800	41,39	10,19	88,0	3,0	74,9	34,87	11,42	88,9	2,2	81,4
Загалом	97,28	23,95	40,9	2,6	54,4	92,40	30,26	36,8	2,2	54,9
шлам	2,72	0,67	45,8	2,5	34,3	7,60	2,49	49,8	2,8	36,2
Всього	100,00	24,62	41,0	2,6	53,8	100,00	32,75	37,8	2,3	53,5

Густина фракції, кг/м ³	3–6 мм					1–3 мм				
	Вихід, %		A ^d , %	Сірка	Леткі	Вихід, %		A ^d , %	Сірка	Леткі
	на клас	на ряд.вуг.				на клас	на ряд.вуг.			
-1500	48,97	5,21	4,6	2,2	37,4	52,32	3,83	4,1	1,9	36,5
1500–1800	1,88	0,20	28,2	8,6	36,2	1,78	0,13	31,5	8,4	35,3
+1800	34,30	3,65	88,0	2,7	78,9	25,68	1,88	87,4	3,5	74,9
Загалом	85,15	9,06	38,7	2,5	54,1	79,78	5,84	31,5	2,6	48,8
шлам	14,85	1,58	51,7	2,5	34,7	20,22	1,48	54,7	2,6	36,0
Всього	100,00	10,64	40,6	2,5	51,2	100,00	7,32	36,2	2,6	46,2

Густина фракції, кг/м ³	0–1 мм					Загалом			
	Вихід, %		A ^d , %	Сірка	Леткі	Вихід, %	A ^d , %	Сірка	Леткі
	на клас	на ряд.вуг.							
-1500	42,02	4,11	12,7	1,8	34,9	50,03	5,8	2,1	38,3
1500–1800	20,76	2,03	28,0	2,4	31,9	3,80	28,6	5,2	34,4
+1800	37,22	3,64	69,1	4,5	48,4	39,72	86,4	2,8	76,2
Загалом	100,00	9,78	36,9	2,9	39,3	93,55	40,9	2,5	54,2
шлам	0,00					6,45	50,9	2,6	35,5
Всього	100,00	9,78	36,9	2,9	39,3	100,00	41,6	2,5	53,0

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ГКД 34.02.305-2002 «Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення».
2. Чернявський М. В., Моїсеєнко О. В. Розробка методів зниження викидів сірчистого ангідриду з теплових електростанцій на основі дослідження сірковміщуючих мінеральних включень та зміни їх вмісту при збагаченні енергетичного вугілля // 14-а Міжнар. наук.-практ. конф. «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку»: Зб. наук. праць. – Київ: ІВЕ НАН України, 2018. – Київ: ІВЕ НАН України, 2018. – С. 185–189.

УДК 662.6

ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ КОТЛОАГРЕГАТИВ КРАМАТОРСЬКОЇ ТЕЦ ТА ТЕЦ-2 "ЕСХАР" З ЧАСТКОВИМ І ПОВНИМ ЗАМІЩЕННЯМ АНТРАЦИТУ ГАЗОВИМ ВУГІЛЛЯМ

Чернявський М. В., к.т.н.; Провалов О. Ю., к.т.н.; Мірошніченко Є. С.

Інститут вугільних енерготехнологій (ІВЕ) НАН України

Згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від 18.04.2018 № 324 «Про затвердження Порядку надання тимчасової підтримки виробникам, що здійснюють комбіноване виробництво електричної та теплової енергії на теплоелектроцентралях», у 2019 році розроблялись ТЕО реконструкції ряду вугільних ТЕЦ. Зокрема, ТЕО реконструкції Краматорської ТЕЦ і Харківської ТЕЦ-2 "ЕСХАР" в частині технічного переоснащення котлоагрегатів ґрунтувались на технічних рішеннях ІВЕ НАН України.

Основне котельне обладнання ТЕЦ-2 "ЕСХАР" – три пилувугільних котли типу 67-2-СП продуктивністю по 230 т/год. (1956). Проектне паливо для котлів 67-2СП – донецький антрацит з калорійністю 6010 ккал/кг і донецьке пісне вугілля з калорійністю 6550 ккал/кг. Для збільшення надійності паливостачання, розширення діапазону регулювання навантаження котлів без підсвічування по умовах стійкого горіння та рідкого шлаковидалення, зменшення вмісту вуглецю в золі виносу до менше ніж 5%, що дасть можливість організації її відпуску споживачам в якості сировини для виробництва цементу і будматеріалів, котли 67-2СП (паропродуктивність 230 т/год., параметри пари 510 °С, 9,8 МПа) плануються до переведення на газове вугілля.

Котли 67-2СП виробництва Подільського заводу ім. Орджонікідзе з рідким шлаковидаленням конструкції Л. Рамзіна мають П-подібну компоновку. В верхній частині опускного конвективного газоходу розташована винесена перехідна зона. Під нею «в розсічку» розташовані дві ступені економайзера і дві ступені трубчатого повітропідігрівника. Живильна вода після проходження економайзера надходить до нижньої радіаційної частини топки, складеної з трубних витків, які поступово піднімаються по стінах топки. Потому пароводяна суміш піднімається в перехідну зону, складену з двох трубних пакетів, і протікає знизу вгору, спочатку через верхній, потім через нижні пакети. Слабоперегріта пара з перехідної зони надходить до верхньої радіаційної частини і далі до конвективного пароперегрівника. Топка оснащена 8 прямоточними пальниками, розташованими на бічних стінках в один ярус. Аеросуміш і вторинне повітря виходять з пальника зі швидкостями близько 40 і 47–49 м/с, відповідно, повноцінне змішування відбувається в топковому об'ємі, за рахунок взаємодії зустрічних струменів.

Кожний котел оснащений двома пилосистемами з сушильним агентом – повітрям, що складаються з кульобарабаних млинів, сепараторів, циклонів, бункеру пилу, млинових вентиляторів, лопатевих пиложивильників, пилопроводів (рис. 1). Подача пилу на пальники – нормальної концентрації, транспортуючий агент – гаряче повітря з ВГД. Відпрацьований запилений сушильний агент подається млиновим вентилятором до 4 скидних пальників, розташованих на фронтальній та тилевій стінках вище за основні пальники.

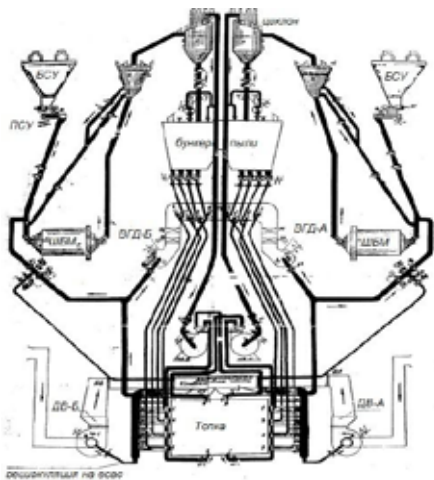


Рис. 1 – Схема пилосистем котлів 67-2СП ТЕЦ-2 «ЕСХАР»

Аналіз особливостей конструкції та роботи котлів 67-2СП показав, що при переведенні на газове вугілля їх конструкцію доцільно залишити без змін. Основні заходи з реконструкції мають стосуватись систем розмелу і транспорту вугільного пилу до основних пальників. Виходячи з принципу максимального використання наявного обладнання, пропонується збереження сушильного агенту-повітря зі зниженням температури аеросуміші за млином до 70°C, збереження режиму спалювання з РШВ, збереження існуючих пальників, схеми транспорту пилу до пальників гарячим повітрям і скидання сушильного агенту до скидних пальників, з впровадженням таких технічних рішень:

- організація регульованої присадки холодного повітря на вхід до ВГД для гарантованого зменшення температури потоку перед пальниками до менше ніж 160°C, в тому числі в режимах пуску та вихолощування пилосистем;
- організація регульованої присадки холодного повітря від ДВ на вхід до млина для забезпечення зниження температури на вході до безпечного рівня, а температури аеросуміші за млинами – не більше ніж 70 °C;
- зменшення витрати МВ із впровадженням рециркуляції сушильного агенту з видачі МВ на вхід до млина, для зменшення витрати скидного повітря та збільшення витрати повітря на основні пальники;
- зменшення діаметру пилопроводів на скидні пальники для збільшення швидкості скидного сушильного агенту в пилопроводах, що залишились, з виконанням нормативної вимоги по швидкості аеросуміші, що запобігає заляганню пилу (не менше ніж 25 м/с).

Основне котельне обладнання Краматорської ТЕЦ – пиловугільні котли типу ТП-170 продуктивністю 170 т/год. з призматичною топкою (1 шт., 1955) і типу БК3-160ПТ продуктивністю по 160 т/год. з напіввідкритою топкою (4 шт., 1972). Проектне паливо – донецький антрацит калорійністю 5790 ккал/кг. Пилосистеми котлів (рис. 2) в цілому подібні до пилосистем ТЕЦ-2 «ЕСХАР».

З урахуванням власності у групі E.CONNECT двох антрацитових шахт в Ростовській області РФ та низького вмісту сірки в цьому антрациті це паливо доцільно розглядати як основне для Краматорської ТЕЦ на досягнутої перспективі. Разом з тим спалювання такого антрациту, який відрізняється низьким виходом летких речовин, на існуючих котлах ТП-170 і БК3-160ПТ пов'язане з необхідністю підсвічування, вузьким діапазоном регулювання навантаження, високим механічним недопалом та вмістом вуглецю в леткій золі.

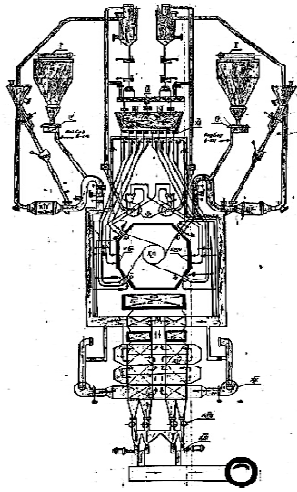


Рис. 2 – Схема пилосистем котлів БКЗ-160 ПТ Краматорської ТЕЦ

Тому для реконструкції Краматорської ТЕЦ в якості основного технічного рішення можна рекомендувати використання суміші 70% антрациту з шахт власності групи E.CONNECT та 30% вітчизняного газового вугілля з виходом летких речовин суміші, як у пісного вугілля (14–16%), з організацією шихтування на складі ТЕЦ за схемою "один конвеєр – два живильники". Це технічне рішення, яке не потребує зміни конструкції котлів та схеми пилосистем, добре апробоване протягом 2016–2018 років на Зміївській та Криворізькій ТЕС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Чернявський М. В., Вольчин І. А., Провалов О. Ю., Мірошніченко Є. С., Росколупа А. І., Моїсеєнко О. В. Розроблення типових технічних рішень для переведення антрацитових та газомазутних котлів ТЕЦ на спалювання газового вугілля // 14-а Міжнар. научн.-практ. конф. «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку»: Зб. наук. праць. – Київ: ІВЕ НАН України, 2018. – С. 189–194.
2. Чернявський М. В., Провалов О. Ю., Безценний І. В., Моїсеєнко О. В. Розробка методів та практичний досвід складання і пиловидного спалювання суміші антрациту з газовим вугіллям на Зміївській ТЕС // Енерготехнології та ресурсосбереження. – 2016. – №4.

ЗМІСТ

ЦИРКУЛЯРНА ЕКОНОМІКА ЯК ШАНС ВИЖИВАННЯ ШАХТАРСЬКИХ РЕГІОНІВ <i>Амоша О. І., Череватський Д. Ю.</i>	3
ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АМОНІАКУ НА ВУГІЛЬНІЙ ТЕЦ <i>Вольчин І. А.</i>	6
ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ГОРІННЯ КОКСОЗОЛЬНИХ ЗАЛИШКІВ РІЗНИХ ВИДІВ ТВЕРДОГО БІОПАЛИВА І <i>Безценний І. В., Бондзик Д. Л., Шудло Т. С., Дунаєвська Н. І.</i>	8
ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ДОМЕННОГО КОКСА <i>Мирошниченко И. В.; Мирошниченко Д. В., Шульга И. В., Балаева Я. С.</i>	11
ГРАНИЦІ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ ДЕРЕВОПОДІБНОЇ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ <i>Квіцинський В. О., Кривошеєв С. І., Макарчук В. М., Марущак С. В.</i>	13
ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ПОГОДНИХ УМОВ НА ПАРАМЕТРИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ОЕС УКРАЇНИ <i>Джигун О. М.</i>	17
ГАЗИФИКАЦІЯ УГЛЯ В ЦИКЛАХ НА ОСНОВЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА <i>Богатова Т. Ф., Рыжков А. Ф., Осипов П. В., Чернова М. Б., Бунькова О. И.</i>	20
РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕСУРСООЩАДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДІЮЧИХ ТЕС <i>Черноусенко О. Ю., Пешко В. А., Риндюк Д. В., Горяженко В. Ю.</i>	22
ІНТЕНСИФІКАЦІЯ РАДІАЦІОННОГО ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ТОПОК І ТЕПЛООБМЕННИКОВ НОВОЇ ГЕНЕРАЦІЇ <i>Сорока Б. С., Згурский В. А.</i>	25
ВЛИЯНИЕ АЗОТА N ₂ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА O ₃ В РАЗРЯДНЫХ УСЛОВИЯХ <i>Дресвянников В. Г.</i>	31
ОСОБЛИВОСТІ МІКРОДИФУЗІЙНОГО СПАЛЮВАННЯ ГАЗУ ЗА СТАБІЛІЗАТОРАМИ В ЗАБАЛАСТОВАНОМУ ОКИСЛЮВАЧІ <i>Черноусенко О. Ю., Бутовський Л. С., Грановська О. О., Мороз О. С., Старченко О. С.</i>	34
РОЗРОБЛЕННЯ АВТОНОМНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВІ ПОРТАТИВНОГО КАТАЛІТИЧНОГО РЕАКТОРА КОНВЕРСІЇ БІОЕТАНОЛУ ТА ВОДНЕВОЇ ПАЛИВНОЇ КОМІРКИ <i>Трипольський А. І., Долгіх Л. Ю., Пятницький Ю. І., Столярчук І. Л., Старая Л. О., Стрижак П. Є.</i>	37

НОВІ ПАРОГАЗОВІ ТА ГІБРИДНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ НА ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ <i>Дудник О. М.</i>	40
ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ УТИЛІЗАЦІЇ ТПВ ЯК ЕНЕРГЕТИЧНОГО РЕСУРСУ В УКРАЇНІ <i>Карп І. М., П'яних К. Є.</i>	43
АВТОНОМНА КОГЕНЕРАЦІЙНА ЕНЕРГОУСТАНОВКА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ПАЛИВ ТА ВОДНЮ <i>Дудник О. М., Соколовська І. С.</i>	46
ПЕРСПЕКТИВИ ВУГІЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В ЄВРОПЕЙСЬКОМУ СПІВТОВАРИСТВІ <i>Дунаєвська Н. І.</i>	49
ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКІВ ГОРІННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА У ПРОГРАМІ ANSYS FLUENT <i>Нехамін М. М., Бондзик Д. Л.</i>	51
АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛООБМЕННИКАХ С ВТОРИЧНЫМИ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ (ПО ДАННЫМ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ) <i>Сорока Б. С., Sandor P., Кудрявцев В. С., Згурский В. А., Воробьев Н. В.</i>	53
ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕТРА И УЛАВЛИВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАХ <i>Вольчин И. А., Ращепкин В. А.</i>	59
АЛГОРИТМ ОЦІНКИ ОЧІКУВАНОВОГО ВИКИДУ ЗАБРУДНЮЮЧОЇ РЕЧОВИНИ ПРИ СПАЛЮВАННІ ОРГАНІЧНОГО ПАЛИВА НА ТЕС В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД КІЛЬКОСТІ ВИРОБЛЕНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЧИ ТЕПЛОТИ <i>Вольчин І. А., Гапонич Л. С.</i>	63
ЯВЛЕНИЯ СИНЕРГИЗМА ПРИ СОЗДАНИИ И КОНВЕРСИИ КОМПОЗИЦИОННОГО СЫРЬЯ ИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ И ПОЛУПРОДУКТОВ КОКСОХИИИ <i>Шендрик Т. Г., Тамко В. А., Шевкопляс В. Н., Бован Л. А.</i>	70
РОЗПОДІЛ КИСНЮ У НЕСКІНЧЕНІЙ ЦИЛІНДРИЧНІЙ ВУГЛЕЦЕВІЙ ПОРІ ПРИ ГОРІННІ <i>Квіцинський В. О., Кривошеев С. І., Макарчук В. М., Маруцак С. В.</i>	76
ВЛИЯНИЕ УПЛОТНЕНИЯ НА ВЫХОД И СОСТАВ ЛЕТУЧИХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ОТХОДОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ <i>Зубкова В., Стройвас А., Белецки М.</i>	80
ТРАНСФОРМАЦІЇ ВУГІЛЬНИХ РЕГІОНІВ НА ПРИКЛАДІ ЗАХІДНОЇ ЄВРОПИ <i>Бондзик Д. Л., Безценний І. В.</i>	83

МОДЕРНИЗАЦІЯ УГОЛЬНИХ МЕЛЬНИЦ ПО ТЕХНОЛОГІИ NER-ART, СПОСОБ ПРОДЛЕННЯ СРОКА СЛУЖБИ І СНИЖЕННЯ ВИБРОСОВ ПЫЛИ І РТУТИ	
<i>Мерхут А., Тymoшук М.</i>	85
РОЗВИТОК ПІДХОДІВ ДО МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕТИКИ ГЕТЕРОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ ТА ГАЗИФІКАЦІЇ ТВЕРДОГО ПАЛИВА	
<i>Топал О.І.</i>	88
РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ДЛЯ ОБЛІКУ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ (ГАЗУ)	
<i>Любарець М. І., Топал О. І.</i>	93
РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАМІЩЕННЯ АНТРАЦИТУ ГАЗОВИМ ВУГІЛЛЯМ ТА ЇХ НАСЛІДКИ ДЛЯ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ	
<i>Чернявський М. В., Дунаєвська Н. І.</i>	97
ШАХТА ЯК ОБ'ЄКТ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В ПОСТ-ВУГІЛЬНІЙ ЕРИ	
<i>Вольчин І. А., Гапонич Л. С.</i>	100
ЕМІСІЯ РТУТИ НА ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ УКРАЇНИ	
<i>Вольчин І. А., Гапонич Л. С.</i>	101
НАУКОВІ ОСНОВИ ТА ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПЕРЕВЕДЕННЯ СЛОВ'ЯНСЬКОЇ ТЕС НА ГАЗОВЕ ВУГІЛЛЯ	
<i>Чернявський М. В., Провалов О. Ю.</i>	106
ДОСВІД ПИЛОПРИГОТУВАННЯ І СПАЛЮВАННЯ СУМІШЕЙ АНТРАЦИТУ З НАФТОВИМ КОКСОМ ТА ГАЗОВИМ ВУГІЛЛЯМ НА СЛОВ'ЯНСЬКІЙ ТЕС	
<i>Провалов О. Ю., Косячков О. В., Росколупа А. І.</i>	110
РОЗРОБКА І АПРОБАЦІЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ПЕРЕВЕДЕННЯ КОТЛІВ МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ З ВУГІЛЛЯ НА ПАЛИВНУ БІОМАСУ (НА ПРИКЛАДІ КОТЛА "РАДІАНТ" ПАРПРОДУКТИВНІСТЮ 20–24 Т/ГОД.)	
<i>Мірошниченко Є. С., Росколупа А. І.</i>	114
ВМІСТ СІРКИ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ ВУГІЛЛІ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФРАКЦІЙ ГУСТИНИ ТА РОЗМІРУ І ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЙОГО ЗМЕНШЕННЯ ПРИ ЗБАГАЧЕННІ ВУГІЛЛЯ	
<i>Чернявський М. В., Дулієнко С. Г., Монастирська Т. М.</i>	117
ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ КОТЛОАГРЕГАТІВ КРАМАТОРСЬКОЇ ТЕЦ ТА ТЕЦ-2 "ЕСХАР" З ЧАСТКОВИМ І ПОВНИМ ЗАМІЩЕННЯМ АНТРАЦИТУ ГАЗОВИМ ВУГІЛЛЯМ	
<i>Чернявський М. В., Провалов О. Ю., Мірошниченко Є. С.</i>	119

