



СКЛАДНІ ТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ І ПРОЦЕСИ

УДК 662.04:549.21

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПУСКОВИХ ТА ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСІВ ТЕРМОХІМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВУГІЛЛЯ В ЦИРКУЛЮЮЧОМУ КИПЛЯЧОМУ ШАРІ (огляд)

Пацков В.П., Крицький А.В., Корнієнко О.В.

Інститут вугільних енерготехнологій НАНУ, вул. Андріївська, 19, Київ-70, 04070

Тел. : (1038044)- 425-20-69, 452-71-21,563-67-80; Факс: (1038044) – 537- 22-41

E-mail: vadim_patskov@ukr.net; andrey_kritskiy@ukr.net; Crz@ukr.net

Вступ

Термохімічна переробка (піроліз, спалювання та газифікація) вугілля у парогазових установках (ПГУ) з циркулюючим киплячим шаром (ЦКШ) дає змогу суттєво покращити техніко-економічні показники процесу порівняно з високотемпературними факельними установками, використовувати низькоякісне та високозольне вугілля, звести до мінімуму шкідливі викиди в атмосферу оксидів сірки та азоту на теплових електростанціях (ТЕС), забезпечити більш високий ступінь переробки палива [1].

Традиційними методами дослідження процесів термохімічної переробки вугілля в ЦКШ є фізичне моделювання на лабораторних та напівпромислових установках з подальшими натурними випробуваннями розроблених технологічних схем на ТЕС.

Але зі збільшенням потужності та розмірів апаратів у вказаних схемах труднощі фізичного моделювання процесів у ЦКШ суттєво зростають.

Перспективним шляхом їх подолання є математичне моделювання, що ґрунтується на числовому експерименті. Реалізація програми розробки методів математичного моделювання процесів термохімічної переробки вугілля в установках з ЦКШ сприяла б підвищенню екологічних показників процесів, скороченню термінів розробки агрегатів, модернізації існуючих інженерних методів розрахунку та проектування обладнання, пошуку оптимальних умов функціонування апаратів та раціональних шляхів використання палив [2]. При цьому можливе суттєве скорочення значних коштів та ресурсів, що витрачаються при отриманні необхідної інформації від відповідних експериментальних установок.

Основні типи установок з ЦКШ

Установки з ЦКШ—складні хіміко-технологічні схеми, які містять апарати, у яких відбуваються специфічні фізико-хімічні, тепломасообмінні та гідроаеродинамічні процеси (рис. 1-3).

Серед численних технологічних схем з ЦКШ виділяють [1; 3] схеми з винесеними циклонами та схеми із жалюзійними сепараторами. Найбільш поширеними є схеми першого типу.

Основними структурними елементами вказаних схем є топки (реактори-газогенератори), які поділяються на дві гідроаеродинамічні зони: киплячого шару та надшарового простору, циклони-сепаратори, тракти повертання та стояки [1-4].

Важливу роль у деяких установках з ЦКШ [1; 5] відіграють винесені апарати – піролізери для попередньої термічної обробки палива шляхом термоконтактного піролізу в умовах високошвидкісного нагрівання в щільному [1; 5], киплячому [6] або фонтануючому шарі [7]. Необхідність застосування таких піролізерів пов'язана з тим, що пряма подача вугілля до реактора (або топки) зумовлює низьку калорійність продуктів



газифікації чи горіння внаслідок розбавлення азотом дуття та згорання частини летких речовин в окислювальній зоні [6].

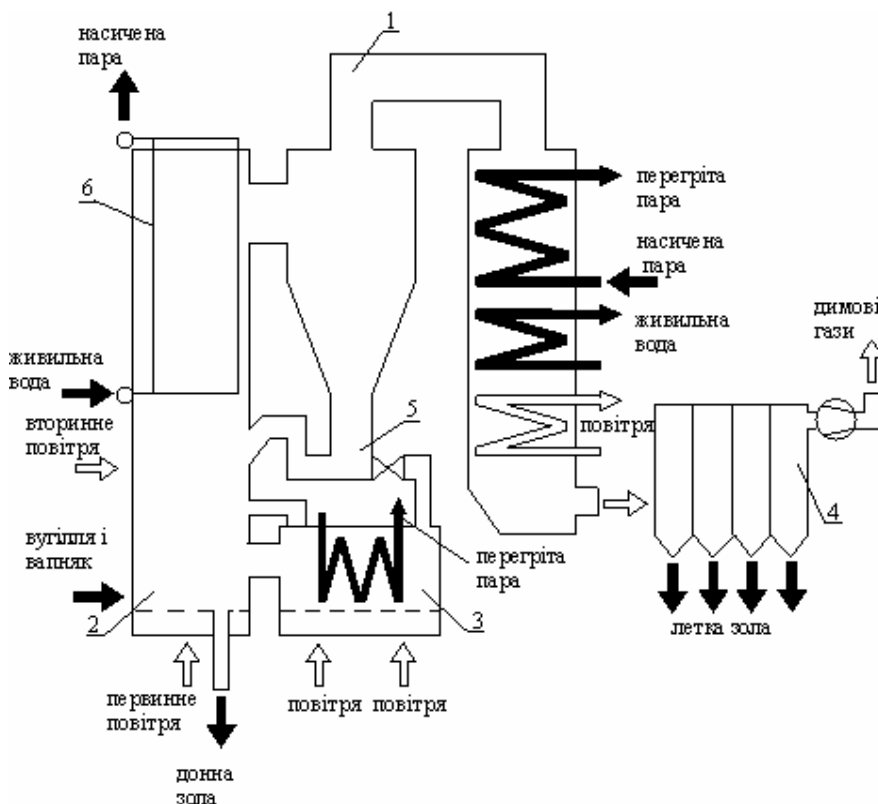


Рис. 1. Схема установки з винесеним циклоном системи "Lurgi": 1 – циклон; 2 – топка; 3 – теплообмінник киплячого шару; 4 – рукавний фільтр; 5 – L-клапан; 6 – випаровувальні поверхні нагріву

Інші структурні елементи схем з ЦКШ: системи очищення, камери допалювання, теплообмінники тощо. – мають допоміжне значення, і закономірності процесів у них менше впливають на режими роботи установок. Тому для розробки загальної методології математичного моделювання складних хіміко-технологічних схем для термохімічної переробки енергетичного вугілля у ЦКШ необхідно насамперед проаналізувати сучасний стан досліджень з вказаної проблематики у їх основних структурних елементах: піролізерах, топках (реакторах-газогенераторах), циклонах-сепараторах, системах повертання.

Піролізери

Термічний розпад (піроліз) вугілля при нагріванні в інертному, окислювальному чи газифікаційному середовищі – складний комплекс великої кількості необоротних фізико-хімічних перетворень, унаслідок яких з вихідної вугільної речовини отримують рідкі, тверді та газоподібні продукти. Вихід і склад цих продуктів залежить від особливостей молекулярної структури та умов нагрівання палива [6]. Найбільш повно вивчений процес піролізу вугілля при повільному нагріванні та атмосферному тиску (технології коксування та напівкоксування [8]). Це вивчення проведене на молекулярному [9; 10] та макрокінетичному [11; 12] рівнях. У першому випадку розглядаються складні багатостадійні механізми термічного розпаду вугілля з константами швидкостей стадій, достовірність яких не завжди підтверджена теоретично чи експериментально (рис. 4). У



другому видима швидкість термічного розпаду вугілля визначається на основі або спрощених ареніусівських виразів зі змінним порядком реакції та ефективними константами видалення летких речовин (S-моделі) [6; 8; 9], або більш складних макрокінетичних моделей, які передбачають Гаусів розподіл за енергіями активації продуктів піролізу (G-моделі) [6; 9; 13] (рис. 5). Параметри в цих моделях також є не завжди достовірними. Відомі також спроби математичного опису процесів перенесення в пористих вугільних пилоподібних частинках при їх піролізі на основі квазігомогенної моделі поруватої структури палив та теорії багатошвидкісних взаємнопроникних континуумів [14]. При цьому практично ігнорується специфіка виникнення та взаємодії в порах трьох фаз: твердої (кокс, волога, леткі речовини та зола), газоподібної (продукти піролізу та хімічних перетворень), проміжної конденсованої (рідкі смоли та вуглеводні, сконденсовані та розчинені гази [6; 15]), фазові переходи (випаровування-конденсація) компонентів смоли та інших продуктів піролізу (враховується тільки первинне видалення летких речовин з пор) [15].

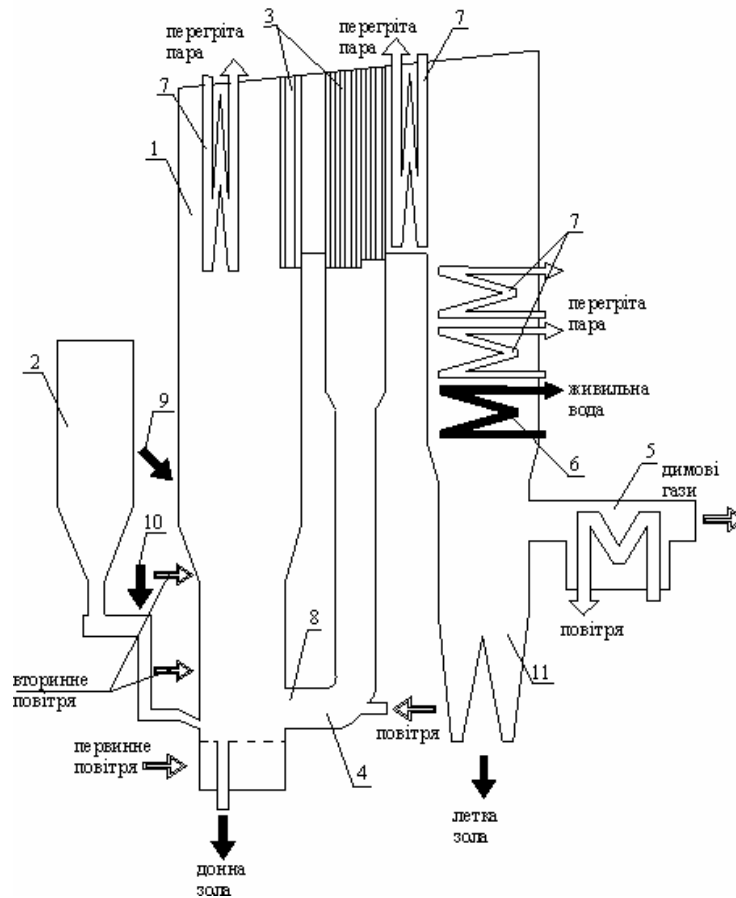


Рис. 2 Схема установки зі швеллерковим сепаратором фірми "Babcock & Wilcox": 1 – топка з випаровувальними поверхнями; 2 – бункер вугілля; 3 – швеллеркові сепаратори; 4 – L-кран; 5 - повітрепідігрівник; 6 - економайзер; 7 – ступіні пароперегрівача; 8 – рециркуляція КЗЗ; 9 – рециркуляція леткої золи; 10 - сорбент; 11 – мультициклон

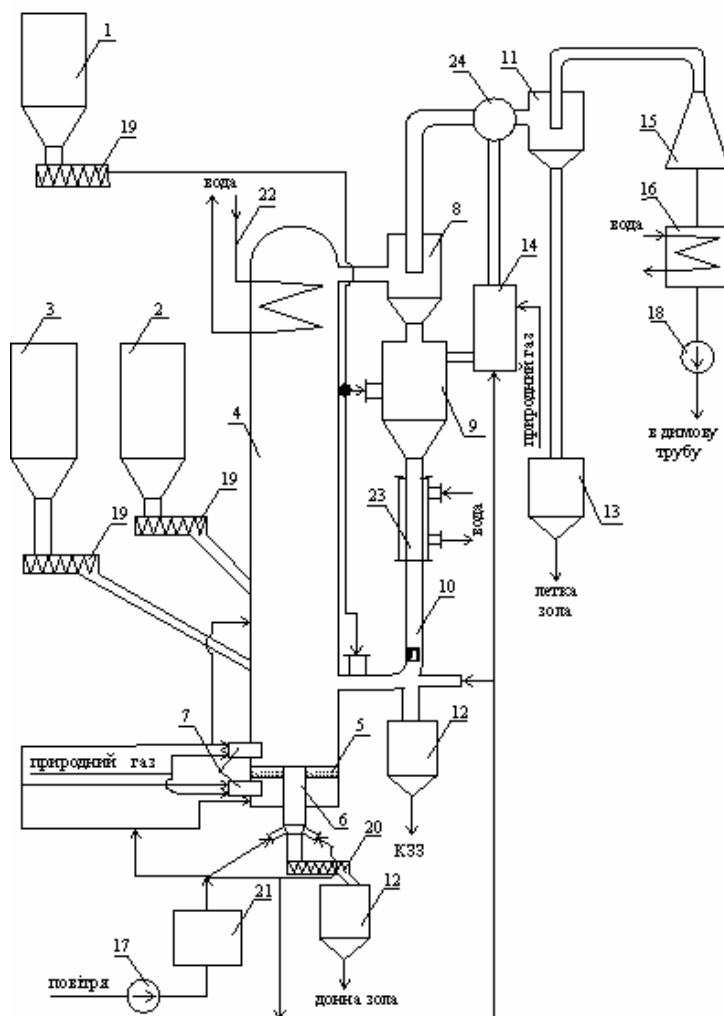


Рис. 3 Схема з піролізером установки ЦКШ-1.0: 1 – бункер вугілля, 2 – бункер крупної фракції вугілля, 3 – бункер золи (інерту), 4 – реактор, 5 – перфорована решітка, 6 – пристрій допалювання КЗЗ в донній золі, 7 – палинкові пристрої, 8 – циклон першого ступеня, 9 – піролізер, 10 – тракт повернення КЗЗ, 11 – циклон другого ступеня, 12 – бункер донної золи та КЗЗ, 13 – бункер легкої золи, 14 – камера згоряння піролізного газу, 15 – дросельний пристрій, 16 – водяний теплообмінник, 17 – компресор, 18 – димосос, 19 – шнеки, 20 – гарячий шнек, 21 – камера підігріву дуття, 22 і 23 – водяні теплообмінники, 24 – змішувач.

Експериментальних даних з динаміки та макрокінетики швидкісного піролізу енергетичного вугілля при атмосферному та підвищеному тисках, при обмеженій евакуації продуктів вкрай мало [6; 7; 18-20]. Математичні моделі та методи обчислення процесів термоконтактного піролізу при підвищених тисках, характерних для режимів функціонування установок з ЦКШ, поки що нечисленні та розрізнені, не мають достатнього теоретичного та експериментального підтвердження [15; 21; 22]. Цей висновок можна зробити щодо списку математичних моделей та процесів термоконтактного піролізу в окремих вугільних частинках і в апаратах-піролізерах з повільно рухомим або нерухомим зернистим шаром [21; 23-26]. Для вказаних процесів у киплячому шарі математичні моделі, алгоритми та програми обчислень поки взагалі відсутні.



Номер	Реакції	$I_{\text{Ф}}, \text{A}$	Е, кДж/ моль * С	Номер	Реакції	$I_{\text{Ф}}, \text{A}$	Е, кДж/ моль * С
1	$(\text{H}_2\text{O})_{\text{T}} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	13,9	214,8	32	$\text{H} + \text{H} + \text{C} \rightarrow \text{H}_2 + \text{C}$	9,0	0,0
2	$(\text{H}_2)_{\text{T}} \rightarrow \text{H}_4$	18,2	371,2	33	$\text{C}_6\text{H}_6 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_2$	12,0	355,3
3	$(\text{CO})_{\text{T}} \rightarrow \text{CO}$	12,4	135,6	34	$\text{C}_7\text{H}_8 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{C}_6\text{H}_5$	14,8	346,3
4	$(\text{CO}_2)_{\text{T}} \rightarrow \text{CO}_2$	14,0	136,5	35	$\text{C}_6\text{H}_5 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_6\text{H}_6 + \text{H}$	9,9	30,9
5	$(\text{C}_2\text{H}_4)_{\text{T}} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4$	20,2	312,7	36	$\text{C}_7\text{H}_8 + \text{H} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_6 + \text{CH}_3$	10,4	8,4
6	$(\text{CH}_4)_{\text{T}} \rightarrow \text{CH}_4$	14,2	215,0	37	$\text{C}_{11}\text{H}_{24} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{13} + \text{C}_5\text{H}_{11}$	16,8	342,3
7	$(\text{C}_6\text{H}_6)_{\text{T}} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_6$	11,9	156,3	38	$\text{C}_6\text{H}_{13} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_4$	13,4	120,4
8	$(\text{C}_7\text{H}_8)_{\text{T}} \rightarrow \text{C}_7\text{H}_8$	11,9	156,3	39	$\text{C}_5\text{H}_{11} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_4$	13,4	120,4
9	$(\text{C}_{13}\text{H}_{18})_{\text{T}} \rightarrow \text{C}_{13}\text{H}_{18}$	11,9	156,3	40	$\text{C}_{13}\text{H}_{18} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_{11}\text{H}_{14}$	15,8	334,4
10	$(\text{C}_{14}\text{H}_{10})_{\text{T}} \rightarrow \text{C}_{14}\text{H}_{10}$	11,9	156,3	41	$\text{C}_{11}\text{H}_{14} \rightarrow \text{C}_9\text{H}_{11} + \text{C}_2\text{H}_3$	14,8	346,9
11	$(\text{C}_{11}\text{H}_{24})_{\text{T}} \rightarrow \text{C}_{11}\text{H}_{24}$	11,9	156,3	42	$\text{C}_9\text{H}_{11} + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_9\text{H}_{12} + \text{H}$	9,9	30,9
12	$(\text{C}_{14}\text{H}_{10})_{\text{T}} \rightarrow \text{C}_{14}\text{H}_{10}$	11,9	156,3	43	$\text{C}_9\text{H}_{12} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5 + \text{C}_7\text{H}_7$	14,8	346,9
13	$(\text{C}_6\text{H}_5\text{OH})_{\text{T}} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	11,9	156,3	44	$\text{C}_7\text{H}_7 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_7\text{H}_8 + \text{H}$	9,9	30,9
14	$\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}$	15,3	434,7	45	$\text{C}_{11}\text{H}_{14} + \text{H} \rightarrow \text{C}_9\text{H}_{12} + \text{C}_2\text{H}_3$	10,4	8,4
15	$\text{H} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{H}_2 + \text{CH}_3$	11,1	52,7	46	$\text{C}_9\text{H}_{12} + \text{H} \rightarrow \text{C}_7\text{H}_8 + \text{C}_2\text{H}_5$	10,4	8,4
16	$\text{CH}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}$	9,5	42,6	47	$\text{C}_{12}\text{H}_{12} \rightarrow \text{C}_{11}\text{H}_9 + \text{CH}_3$	14,8	346,9
17	$\text{CH}_3 + \text{CH}_3 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6$	10,4	0,0	48	$\text{C}_{11}\text{H}_9 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_{11}\text{H}_{10} + \text{H}$	9,9	30,9
18	$\text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{CH}_3 + \text{CH}_3$	17,4	376,6	49	$\text{C}_{11}\text{H}_{10} \rightarrow \text{C}_{10}\text{H}_7 + \text{CH}_3$	14,8	346,9
19	$\text{CH}_3 + \text{CH}_3 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6 + \text{H}_2$	13,8	179,7	50	$\text{C}_{10}\text{H}_7 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_{10}\text{H}_8 + \text{H}$	9,9	30,9
20	$\text{CH}_3 + \text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_5$	9,0	44,3	51	$\text{C}_{12}\text{H}_{12} + \text{H} \rightarrow \text{C}_{11}\text{H}_{10} + \text{CH}_3$	10,4	8,4
21	$\text{H} + \text{C}_2\text{H}_6 \rightarrow \text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_5$	11,1	40,5	52	$\text{C}_{11}\text{H}_{10} + \text{H} \rightarrow \text{C}_{10}\text{H}_8 + \text{CH}_3$	10,4	8,4
22	$\text{C}_2\text{H}_5 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_4$	13,9	174,3	53	$\text{C}_{10}\text{H}_8 + \text{H} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_6\text{H}_5$	10,0	179,5
23	$\text{C}_2\text{H}_5 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6 + \text{H}$	9,6	58,4	54	$\text{C}_{10}\text{H}_8 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_6\text{H}_4$	13,0	334,4
24	$\text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_3$	13,0	451,4	55	$\text{C}_{14}\text{H}_{10} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_6\text{H}_4 + \text{C}_6\text{H}_4$	13,7	334,4
25	$\text{H} + \text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5$	10,6	10,9	56	$\text{C}_6\text{H}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C} + \text{C}$	13,0	250,8
26	$\text{H} + \text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_3$	8,5	18,8	57	$\text{C}_{14}\text{H}_{10} + \text{H} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_{10}\text{H}_7$	10,0	179,7
27	$\text{CH}_3 + \text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_3$	8,6	33,4	58	$\text{C}_5\text{H}_5\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{C}_5\text{H}_4$	14,0	209,8
28	$\text{C}_2\text{H}_3 \rightarrow \text{H} + \text{C}_2\text{H}_2$	14,6	197,7	59	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	5,2	121,8
29	$\text{C}_2\text{H}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}$	9,9	30,9	60	$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{CO}$	11,8	346,9
30	$\text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow \text{C} + \text{C} + \text{H}_2$	6,0	125,4	61	$\text{C} + \text{H}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4$	11,4	230,3
31	$\text{H} + \text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_3$	10,6	5,4				

Рис. 4. Кінетична схема

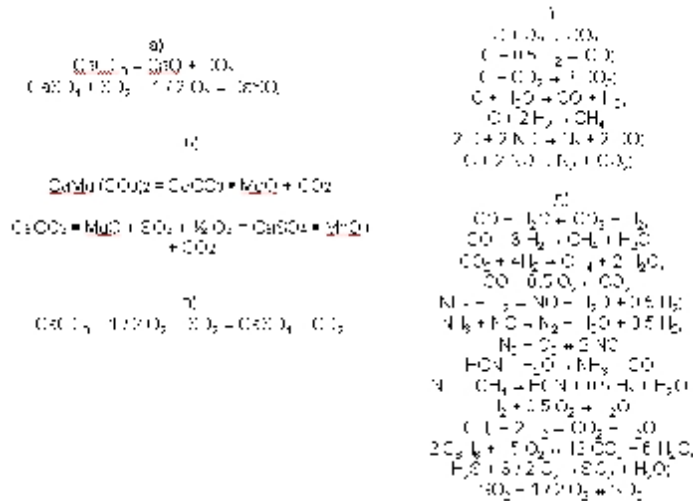


Рис. 5. Стехіометричний механізм реакцій в ЦКШ: а) термічний розклад вапняку при атмосферному тиску, б) те ж саме доломіт, в) підвищений тиск, г) гетерогенні хімічні перетворення, д) гомогенні хімічні перетворення

Недостатньо враховується при моделюванні процесів піролізу вугільних частинок і вплив вторинних гетерогенних реакцій коксозольного залишку палива з продуктами



піролізу, процесів перенесення і вторинних хімічних перетворень у газовій оболонці біля зовнішньої поверхні частинки [16; 17].

Реактори-газогенератори (топки)

Горіння-газифікація вугілля у реакторах-газогенераторах (топках) з ЦКШ характеризується перебігом у їх просторі широкого спектра гетерогенних та гомогенних хімічних реакцій [1; 2; 16; 17; 23; 27; 28], існують принципово різні гідроаеродинамічні зони: киплячого шару та надшарового простору [2; 4; 23], суттєвим обміном масою, імпульсом та енергією між фазами та стінками апарату [2; 4; 21; 23; 25], поліфракційністю твердих фракцій, наявних в апаратах (паливо, зола, продукти перетворень вапняку тощо). Вказані обставини суттєво ускладнюють математичне моделювання процесів у реакторах-газогенераторах (топках) ЦКШ.

Для умов функціонування реакторів ЦКШ у нинішній час експериментально найбільш детально вивчені макрокінетичні закономірності гетерогенних реакцій взаємодії коксів енергетичних палив з O_2 та CO_2 [29; 30]. Для оцінювання видимих швидкостей цих реакцій пропонуються ареніусівські вирази зі змінним видимим порядком реакції та макрокінетична модель Ленгмюра–Хіншельвуда [31; 32]. Недостатньо поки що розроблені математичні моделі та методики обчислення для оцінки коефіцієнтів ефективної дифузії та теплопровідності всередині пор [31; 33], опису нестационарного характеру макрокінетичних залежностей видимих швидкостей реакції від ступеню конверсії палива [34], умов займання та згасання частинок, реалізації стаціонарних температурних режимів процесу, границь реагування палив з газами [31; 33]. Поки що недостатньо вивчені макрокінетичні закономірності реакцій парової та гідрогазифікації коксів енергетичних палив у киплячому шару [35], відновлення NO на вугіллі [28], утворення та зв'язування оксидів сірки та азоту [1; 27; 28; 36-38].

Зона киплячого шару. Для нестационарних режимів процесів повітряної [39] та пароповітряної газифікації [40; 41] високозольного енергетичного вугілля в зоні киплячого шару реактора-газогенератора пілотної демонстраційної установки з ЦКШ під тиском [1] розроблена математична модель на основі двофазової теорії псевдозрідження [42], алгоритми та програми обчислення. Проаналізовано вплив параметрів моделі на перебіг процесу.

Для опису процесів у зоні киплячого шару в нестационарних умовах становить інтерес двовимірна математична модель [43], яка дає змогу незалежно від режиму псевдозрідження визначити основні характеристики киплячого шару. Підхід полягає у використанні рівнянь механіки гетерогенних середовищ (розширеної системи рівнянь Нав'є–Стокса [44]) та проведенні прямого числового моделювання плоского нестационарного руху газу та дисперсного матеріалу у псевдозрідженому шарі. Однак для умов термохімічної переробки вугілля у ЦКШ модель та числовий алгоритм розрахунку [43] потребують модифікації та уточнення в плані урахування особливостей хімічних перетворень та тепломасообміну, незважаючи на спроби це зробити у подальшій роботі даних авторів [45].

Детальних математичних моделей, алгоритмів та програм обчислення стаціонарних режимів процесів термохімічної переробки поліфракційного вугілля у зонах киплячого шару реакторів з ЦКШ, які б комплексно враховували хімічні реакції, що протікають у шарі, процеси тепломасообміну та перенесення імпульсу, поки що невідомо. Як основу для створення подібних моделей можна рекомендувати задачі [46; 47]. Інженерні спрощені методики типу [48] не враховують усіх факторів, які впливають на перебіг процесу, зокрема, розглядають лише одну реакцію $C + O_2 = CO_2$ із застосуванням для опису процесу горіння моделі частинок “з ядром, яке стискається” [49]. Остання, як свідчать дані робіт [1; 22; 27; 31; 49], не завжди відповідає реальним фізико-хімічним закономірностям горіння коксів енергетичних палив у киплячому шарі.



Перехідна зона. У [4; 50] побудована узагальнена стаціонарна модель вигорання коксових частинок у реакторі з ЦКШ. Вона відрізняється урахуванням внутрішньої й зовнішньої циркуляції частинок. Отримано замкнену систему двох інтегральних та двох функціональних рівнянь щодо функцій розподілу частинок за масовими концентраціями вуглецю в зоні киплячого шару, ядрі та кільцевій області перехідної зони надшарового простору. Побудовано розв'язок вказаної системи за двома параметрами. Знайдена область оптимальних режимів, що забезпечує найбільш повне вигорання палива у топці з ЦКШ. Встановлено, що урахування внутрішньої циркуляції дає змогу суттєво уточнити закономірності вигорання коксу та помітно знизити його середню концентрацію в реакторі.

Однак ця модель, яка ґрунтується на позонному статистичному підході, є вельми спрощеною у плані аналізу макрокінетики горіння коксових частинок, що не повною мірою відповідає реальним фізико-хімічним закономірностям вигорання коксів у киплячому шарі [1-3; 11; 13; 14; 16; 17; 27; 41]. Недостатньо відображені в ній і складні особливості гідро- та аеродинаміки процесів у ЦКШ, що суперечить висновкам її ж авторів у [51].

Зона надшарового простору. Цей структурний елемент установок з ЦКШ вивчений найбільш повно, але переважно для стаціонарних умов функціонування апаратів і атмосферного тиску. Існують одномірні [52; 53] та двомірні варіанти [51] моделей горіння поліфракційних ансамблів коксозольних частинок у надшаровому просторі установок з ЦКШ, побудовані на основі теорії взаємнопроникних континуумів [44].

У [52; 53] побудована двозонна стаціонарна напівемпірична модель процесів перенесення у надшаровому просторі реактора з ЦКШ (рис. 6) являє собою систему „жорстких” звичайних диференціальних рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії, яка описує поведінку газової фази та окремих фракцій твердих частинок. Враховується вплив гетерогенної реакції $C+O_2$ на тепловиділення та газофазний масообмін між ядром та пристінковою областю, радіаційний і конвективний теплообмін між газом та частинками, перенесення ентальпії між зонами твердої фази та газу, радіаційний теплообмін між зонами, конвективний теплообмін між газом у ядрі потоку та поверхнею частинок палива, які розташовані в кільцевій зоні та границі поділу зон ядро-кільце, радіаційний теплообмін між низхідним щільним шаром та стінкою, теплообмін між газовим потоком та дисперсною фазою, конвективний теплообмін між газом у ядрі потоку та твердою фазою у кільцевій зоні, конвективний теплообмін між газом у кільцевій зоні та стінкою.

Виконані числові розрахунки особливостей процесів аеродинаміки, тепломасообміну та горіння в ядрі потоку та пристінковій зоні для випадку горіння антрацитового штибу АШ відносно діючої установки КФС-0.2 [1; 3]. Показано, що основним елементом установки з ЦКШ є реактор, у нижній частині якого знаходиться киплячий шар, у верхній – надшаровий простір. У центральній частині надшарового простору реалізується висхідний рух двофазового потоку (зона ядра), а в периферійній області – низхідний потік частинок, який забезпечує внутрішню циркуляцію твердої фази в топці.

Відмінністю аеродинаміки НП (надшарового простору) установок з ЦКШ є висока концентрація дисперсної фази, що суттєво підсилює ефекти міжчастинкових зіткнень, зумовлених осередненим та хаотичним рухом полі- та монофракційних коксозольних частинок. У підсумку проходить генерація, яка суттєво впливає на перемішування твердої фази й аеродинамічної структури потоку в аксіальному та радіальному напрямках [43; 45; 51; 54].

Оскільки процеси перенесення у НП відбуваються при порівняно низьких температурах ($850 \div 950$ °С), особливу увагу в [51; 53] приділяють часу перебування і концентрації (реакційній поверхні) паливних частинок у активній зоні (ядрі потоку). Ці два гідродинамічні фактори по-різному впливають на процес горіння паливних частинок. Так, збільшення середнього (за розрізом надшарового простору) значення



концентрації дисперсної фази підвищує її концентрацію в активній зоні. При цьому зростає витрата частинок у периферійній частині кільцевої зони, яка практично не бере участі в горінні через малу концентрацію кисню. Однак у цьому випадку зменшується розріз ядра, через яке проходить більше ніж 70% загального потоку газу, що приводить до зменшення швидкості двофазового потоку на зменшення часу його перебування в реакційній зоні. Таким чином, аеродинамічна структура, характерна для ЦКШ, суттєво впливає на процес горіння твердого палива.

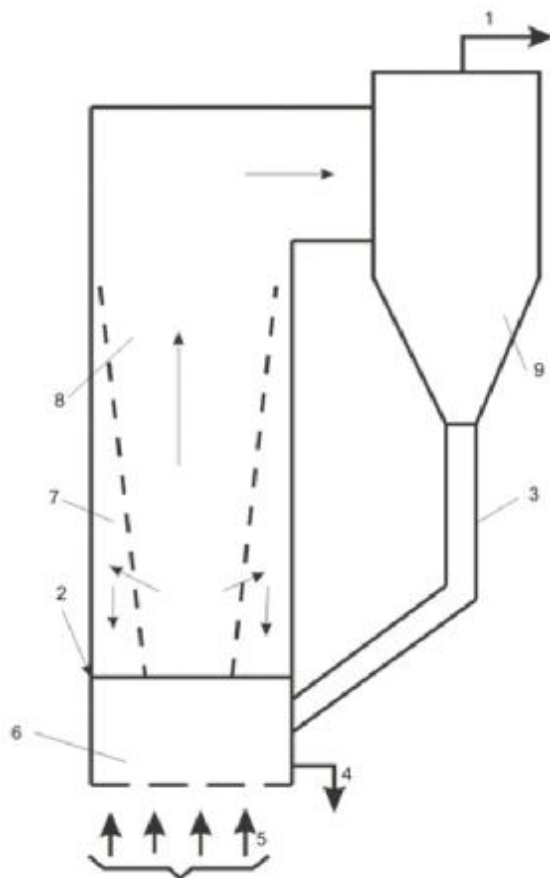


Рис. 6. Схема апарату з циркулюючим киплячим шаром: 1 – гази, що відходять до конвективної шахти; 2 – подача вихідного палива; 3 – опускний стояк; 4 – вихід зливної золи; 5 – подача повітря під решітку; 6 – киплячий шар; 7 – кільцева зона; 8 – ядро потоку; 9 – циклон

Однак у реальних умовах у надшаровому просторі реакторів ЦКШ протікає набагато більша кількість гетерогенних [1; 3; 11; 12; 14; 17; 23; 25; 27; 35; 36; 38-40; 46; 47], зокрема, реакцій термічного перетворення вапняку [1; 27; 28], NO_x та SO_x [16; 17; 27; 28; 36–38]. Це суттєво ускладнює, зокрема, обчислення концентрацій і температур газу та твердих частинок. Крім того, у системах, що розглядаються, не враховується наявність додаткових сортів твердих частинок: вапняку та продуктів його перетворення, що ускладнює аналіз процесів взаємодії між частинками твердих фракцій, які, до речі, практично не враховуються авторами [52; 53], незважаючи на їх же власні рекомендації про необхідність цього у [51]. Не наводиться у [52; 53] інформації про цілий ряд важливих параметрів моделі, таких як макрокінетичні характеристики та коефіцієнти тепло- та масообміну між фазами та стінками апарату. Вказана обставина суттєво



ускладнює застосування моделей, подібних [52; 53], для математичного опису стаціонарних режимів процесів термохімічної переробки вугілля в ЦКШ.

Щодо моделей нестационарних режимів процесів термохімічної переробки вугільних палив, що існують зараз, то варто виокремити одновимірну математичну модель надшарового простору, розроблену в [2; 23] на основі теорії взаємопроникних багатошвидкісних континуумів. У моделі враховано майже всі гетерогенні та гомогенні хімічні реакції, можливі в надшаровому просторі, окрім перстворень CaCO_3 , NO_x та SO_x , а також основні гідроаеродинамічні та тепломасообмінні процеси, що відбуваються у цих умовах. Розроблені ефективні й стійкі алгоритми та програми обчислення, які дають змогу отримувати числові результати, які не суперечать існуючим уявленням про фізико-хімічні закономірності класу процесів, які розглядаються. Широкого класу обчислень за вказаними програмами та порівняння з експериментальними даними в [2, 23], на жаль, поки не проводилося.

У [51] отримана двовірсна система рівнянь, стаціонарного руху газу та поліфракційних ансамблів частинок коксу та золи у висококонцентрованому висхідному дисперсному потоці. Враховуються міжфазова та міжчастинкова взаємодія, турбулентне та псевдотурбулентне перенесення частинок, вплив стінок каналу та масових сил. Отримані формули для визначення швидкості генерації та дисипації енергії хаотичного (турбулентного та псевдотурбулентного) руху частинок унаслідок їх зіткнень, а також для сили аеродинамічного опору. Обчислене середнє значення сили міжчастинкової взаємодії, коефіцієнти псевдотурбулентного перенесення для „газу” частинок та інші величини, необхідні для замкнення системи рівнянь аеродинаміки зони пневмотранспорту реактора з циркулюючим киплячим шаром. Сформульовані граничні умови до диференціальних рівнянь, які описують двовірний рух газу та полідисперсних ансамблів частинок коксу та золи у висококонцентрованому дисперсному потоці. Досліджено особливості аеродинаміки зони пневмотранспорту надшарового простору реактора з ЦКШ. Модель узагальнена на випадок неізотермічного потоку з гетерогенним горінням вуглецю. Виконані числові дослідження особливостей теплообміну, горіння та руху частинок. Наведена математична модель не може бути використана як окремий блок обчислення надшарового простору, а тільки з урахуванням взаємозв'язку з зоною киплячого шару й наступним за трактом елементом контуру – циклоном. Принципова складність обчислення у циркуляційній системі полягає у тому, що характеристики палива на вході у топку (реактор і окремі зони) залежать від процесів у циклонах або реакторах –піролізерах. Тому обчислення топкової камери чи реакційного простору окремо від інших апаратів у достатньо конкретній постановці виконане бути не може, а розрахункова схема повинна включати всі основні функціональні елементи циркуляційного контуру [54; 55]. Розрахункові схеми [51] цього аспекту не враховують, як і результати [52; 55]. Для цієї моделі характерні ті самі недоліки в плані урахування макрокінетики, як і для її одноірних варіантів [52; 53].

У роботі [45] запропонована математична модель для опису процесів перенесення маси, імпульсу та енергії в установках з циркулюючим киплячим шаром. Числова реалізація цієї моделі дає змогу обчислювати важливі інтегральні характеристики процесів, а також представляти картину стану поліфракційної дисперсної системи у пристроях з ЦКШ. Відмінність цієї моделі від [52; 53] є більш детальне врахування теплових та гідроаеродинамічних ефектів, а саме процесу перенесення променевої енергії між газом та частинками, описаний за допомогою локальної одноірної моделі [56], механічної взаємодії між частинками та їх дроблення. Однак у цій моделі відсутній поділ реактора ЦКШ на гідроаеродинамічні зони, не врахований вплив на процес хімічних перетворень, які мають місце в реакторі, взаємозв'язок з іншими апаратами схеми. Розроблена модель дала добрі результати з передбачення особливостей гідроаеродинаміки неоднорідних киплячих шарів [43] і може бути рекомендована для розробки



математичних описів та алгоритмів обчислення процесів термохімічної переробки вугілля у ЦКШ при відповідному уточненні аспектів, згаданих вище.

Циклони-сепаратори

Методи математичного моделювання процесів перенесення маси, імпульсу та енергії в циклонах-сепараторах ЦКШ, для яких є характерною наявність у їх просторі високонцентрованих закручених турбулентних дисперсних поліфракційних ансамблів твердих фракцій та газу, досі практично відсутні. Існуючі методи оцінювання ефективності уловлення твердих фракцій у циклоні переважно дуже наближені, не враховують вказаних обставин [57; 58; 78]. Вони є прийнятними лише для стандартних циклонів зі слабкозапиленими потоками.

Тракти повертання та стояки

Характерною рисою котлів з ЦКШ є наявність пристроїв для уловлення золи та систем повертання матеріалів у топку. Ефективність роботи цих пристроїв впливає на більшість показників котла (стабілізація температури у шарі та надшаровому просторі, відведення теплоти до настінних екранів, рівень викидів SO_2 тощо). Важливою є й наявність визначеної кількості частинок, які можуть виноситись з топки, уловлюватись та повертатися до шару. Фактично ефективність золоуловлювача обумовлює кратність циркуляції та розмір частинок [69; 78].

У [78] наведені результати досліджень роботи систем уловлення та повертання частинок на аеродинамічному стенді та вогневій установці, що моделюють умови роботи котлів з циркулюючим киплячим шаром. Розроблені розрахункові інженерні залежності для визначення основних характеристик сепараторів, опускних стояків та затворів. Виконане порівняння цих залежностей з відомими експериментальними даними, отриманими на промислових котлах. Однак детальні математичні моделі, алгоритми та програми з прогнозування режимів функціонування систем повертання в установках з ЦКШ поки що невідомі.

Технологічні схеми з ЦКШ

Єдиної методології математичного моделювання, обчислення та оптимізації технологічних схем для процесів термохімічної переробки вугілля у ЦКШ з урахуванням наявності зон киплячого шару, перехідної зони та надшарового простору і взаємозв'язку між ними поки що немає. Проводяться переважно експериментальні дослідження гідроаеродинамічних процесів у ЦКШ [54; 59–62], створюються спрощені інженерні методики розрахунків схем з ЦКШ [1; 3; 62–73]. У [70] запропонована спрощена математична модель для числового дослідження впливу експлуатаційних умов, розмірів частинок, температури, надлишку повітря та лінійної швидкості газу на ефективність горіння вугілля в камері згорання з циркулюючим псевдозрідженим шаром. Для опису осьового розширення частинок використана модифікована модель з експоненціальним згасанням Д. Кунії та О. Левеншпиля [42], яка поділяє шар на щільну нижню та розріджену верхню частини. В області розрідженої течії частинок використовується модель потоку, яка включає ядро та зовнішню кільцеву область, у яких проходить дисперсія ядра. Результати обчислень зіставлені з експериментальними даними, отриманими при спалюванні вугілля (два види лігнітів та антрацити) у псевдозрідженому шарі.

Відповідно до фізичної моделі циркуляційної системи котлів з ЦКШ [71] швидкість циркуляції визначається ефективністю роботи сепаратора, інтенсивністю процесів горіння, а також спеціальним параметром, який характеризує масове співвідношення між частинками, що поступають до апарату, та витратою вугілля. Запропоновані кореляції



дають змогу оцінювати показники циркуляційної системи котлів з ЦКШ та якість їх роботи.

У моделі техніко-економічного дослідження [74] закладені принципи ексергетичної методології [75; 76] та концепції теорії агрегативних систем [77]. При цьому аналіз та оптимізація параметрів функціонування котлоагрегатів виконується шляхом послідовних операцій:

1. Умовне розбиття теплоенергетичної установки на декілька функціональних частин і подання її у вигляді ексергетичної агрегативної системи.

2. Математичний опис (моделювання) функціонування та використання цієї моделі при розрахунках в обчислювальному блоці, який імітує роботу енергоблоку.

3. Оптимізація параметрів функціонування за умовами дії обмежувальних факторів.

У варіантах, що розглядаються, виконують із взаємною ув'язкою теплові та балансові розрахунки котлів, турбін, систем регенерації та підігріву мережевої води; визначаються капітальні витрати на основне устаткування: турбоагрегат, котел, допоміжні системи (паливоподачі, пилоприготування, тягодуттєве устаткування, системи евакуації золи та шлаку) тощо. Розроблена схема – сукупність математичних моделей елементів енергоблоку, що реально функціонує. Відповідно до методу декомпозиції в технологічній схемі виділяють декілька частин, що функціонують і зв'язки між якими нечисленні.

За прийнятою методологією розрахункова схема також включає в себе процедури визначення основних витратно-термодинамічних параметрів енергоблоку. Розрахунок теплової схеми проводиться ітераційним шляхом по відношенню до витрати палива на енергоблок.

Розроблені математичні моделі забезпечують досить точний опис реальних процесів у відповідно до завдань дослідження. Моделі включають у себе зв'язок між вихідними та вхідними витратно-термодинамічними параметрами, а також залежності між цими параметрами та конструктивними характеристиками елементів, перевірку параметрів за всіма видами обмежень.

Наведений інтегральний критерій оцінювання та визначений діапазон ефективності функціонування енергоблоків з ЦКШ-котлоагрегатами з урахуванням типу вугілля у широкому інтервалі потужностей.

Висновки

Таким чином, проведений аналіз літературних даних підтверджує висновки попереднього огляду [2], що методи математичного моделювання, обчислення та оптимізації процесів термохімічної переробки (піролізу, спалювання та газифікації) у ЦКШ поки що розроблені недостатньо. Необхідні подальші системні дослідження в напрямі створення комплексних моделей, методів обчислення та оптимізації, відповідних пакетів прикладних програм для ПЕОМ на основі загальної методології складних хіміко-технологічних схем, які б з прийнятною для інженерно-технологічної практики точністю відображали основні закономірності процесів в основних структурних елементах установок та дозволяли б проводити аналіз режимів їх функціонування в широкому діапазоні режимних параметрів, конструктивних розмірів, фізико-хімічних та структурних характеристик палива. Проведення моделювання та аналізу процесів в окремо взятих елементах та апаратах установок, як це практикується в більшості робіт, без урахування їх взаємозв'язку з іншими структурними елементами, буде приводити до того, що процес переробки вугілля у ЦКШ проходитиме далеко не в оптимальному режимі. До теперішнього часу потребують особливої уваги питання коректного моделювання макрокінетичних закономірностей перебігу процесів у ЦКШ, конвективного, радіаційного та пристінкового теплообміну, шлакування, взаємодії частинок, масообміну між фазами. Відомі алгоритми обчислення досить складні, потребують великої кількості ітерацій та витрат машинного часу, не завжди прийнятні та стійкі для вирішення класу завдань, що



розглядаються, зокрема, для аналізу нестационарних режимів функціонування установок. Численні комерційні пакети прикладних програм (FLUENT, PHOENICS, FIRE та ін.) недостатньо враховують взаємозв'язок між апаратами подібного класу установок, а існуючі нечисленні балансно-термодинамічні методики не відображають закономірностей процесів усередині кожного з апаратів.

Література

1. Корчевой Ю.П. Экологически чистые угольные энерготехнологии / Ю.П. Корчевой, А.Ю. Майстренко, А.И. Топал. – Киев : Наукова думка, 2004. – 182 с.
2. Пацков В.П. Моделирование процессов термохимической переработки в условиях с циркулирующим кипящим слоем. Состояние проблемы (обзор) / В.П. Пацков // Энергетика, економіка, технології, екологія. – 2001. – № 2. – С. 31–34.
3. Корчевой Ю.П. Технологии сжигания углей в циркулирующем кипящем слое: произв. изд. / Ю.П. Корчевой, А.Ю. Майстренко, С.В. Яцкевич. – Киев : ОВПЭ ИПЭ НАНУ, Минэнерго Украины, 1993.
4. Шрайбер О.А. Моделирование процессу вигорання вугільних частинок у циркулюючому киплячому шарі / О.А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28. – № 4. – С. 23–28.
5. Сжигание твердого топлива в кипящем слое под давлением / Вольчин И.А., Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю. и др. – Препринт НТЦУЭ НАН и Минэнерго Украины. – Киев, 1997. – 68 с.
6. Получение энергетического и бытового газа путем термоконтактного пиролиза в контуре ЦКС / Вольчин И.А., Чернявский Н.В., Тальнова Г.Н. и др. – Препринт НАНУ: Институт проблем энергосбережения. – Киев, 1993. – 60 с.
7. Факторы оптимизации предтопка с циркулирующим кипящим слоем и реактором термоконтактного пиролиза / Перепелкин А.А., Карамнова С.В., Вольчин И.А. и др. // Твердотопливные энергетические технологии : тез. докл. сем. – Киев : Знание, 1992. – С. 5–11.
8. Глущенко Л.С. Теоретические основы технологии горных ископаемых / Л.С. Глущенко. – М. : Металлургия, 1990. – 150 с.
9. Solomon P.R, Serio M.A., Suuberg. Coal pyrolysis experiment. Kinetic rate and mechanisms // Progress in Energy and Combustion Science. – 1992. – Vol. 18. – № 2. – P. 133–220.
10. Расчетно-теоретическое исследование процессов пиролиза и гидропиролиза угля / Калинин Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. и др. // Кинетика и катализ. – 1985. – Т. XXVI. – Вып. 6. – С. 1336–1343.
11. Бойко Е.А. Экспериментально-расчетная методика оценки кинетических параметров процессов термохимического превращения твердых органических топлив / Е.А. Бойко, С.В. Пачковский, С.Г. Дидичин // ФГВ. – 2005. – Т. 41. – № 1. – С. 55–65.
12. Бойко Е.А. Кинетика термохимического превращения углей Канско-Ачинского бассейна / Е.А. Бойко, С.Г. Дидичин, П.В. Шишмарева // ХТТ. – 2004. – № 3. – С. 3–12.
13. Герасимов Г.Я. Моделирование процесса пиролиза угольных частиц / Г.Я. Герасимов // ИФЖ. – 1999. – Т. 77. – № 2. – С. 252–259.
14. Быков В.И. Диффузионно-кинетическая модель горения частиц в газовом потоке / В.И. Быков, Т.И. Вишневецкая, Н.М. Цырюльниченко // ФГВ. – 1997. – Т. 33. – № 4. – С. 39–45.
15. Пацков В.П. Влияние фазовых превращений и тепло-массообмена на протекание процессов пиролиза одиночных частиц высокозольных углей при повышенных давлениях / В.П. Пацков // ИФЖ. – 2007. – Т. 80. – № 2. – С. 127–138.
16. Майстренко О.Ю. Спряжена задача тепло- та масообміну при термохімічній переробці окремих вугільних частинок у киплячому шарі / О.Ю. Майстренко,



В.П. Пацков, С.М. Василенко // Проблемы машиностроения. – 2004. – Т. 7. – № 4. – С. 92-99.

17. Майстренко О.Ю. Чисельне моделювання тепломасообміну вугільної частинки при обтіканні високотемпературним газовим потоком / О.Ю. Майстренко, В.П. Пацков, С.М. Василенко // Проблемы машиностроения. – 2005. – Т. 8. – № 3. – С. 87-93.

18. Каширский В.Г. Кинетика термического разложения топлива в условиях высокоскоростного нагрева / В.Г. Каширский, В.И. Быков, Н.М. Цырюльниченко // Комплексная переработка Канско-Ачинских углей. Вопросы получения синтетического топлива : сб. науч. тр. – Красноярск : Изд-во Кр.ГУ, 1983. – С. 32-35.

19. Основы практической теории горения : учеб. пособ. для ВУЗов / В.В. Померанцев, Н.М. Арефьев, П.Б. Ахмедов и др. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

20. Гапонич Л.С. Качественные и количественные характеристики пиролиза углей в кипящем слое / Л.С. Гапонич, Н.В. Чернявский // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. – № 3. – С. 7-11.

21. Гапонич Л.С. Газовыделение при термоконтактном пиролизе углей в зависимости от давления и среды / Л.С. Гапонич, Г.И. Тальнова, Н.В. Чернявский // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1998. – № 2. – С. 13-17.

22. Рохман Б.Б. О некоторых методах термохимической переработки твердых топлив в циркулирующем кипящем слое / Б.Б. Рохман // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28. – № 3. – С. 68–78.

23. Бондзик Д.Л. Методы результаты расчета динамики газовыделения при скоростном пиролизе угля / Д.Л. Бондзик, С.Г. Дулиенко, Н.В. Чернявский // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2005. – № 6. – С. 3–14.

23. Числове моделювання нестационарних режимів процесу термохімічної переробки вугілля в технологічній установці з ЦКШ під тиском / О.Ю. Майстренко, В.П. Пацков, О.І. Топал та ін. // Металургійна теплотехніка : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ: Пороги, 2005. – С. 307–317.

24. Пацков В.П. Математическое моделирование процесса термоконтактного пиролиза высокозольного каменного угля в неподвижном зернистом слое / В.П. Пацков // XIII межд. конф. по хим. реакторам, 18-21.06.1996, Новосибирск, Россия. – Новосибирск : Институт катализа СО РАН, 1996. – Ч. 1. – С. 251-287.

25. Волков Э.П. Методы моделирования процессов горения твердых топлив в циркуляционных системах / Э.П. Волков, Л.И. Зайчик, В.А. Першуков // Химическая физика процессов горения и взрыва: Горение : тез.Х симпозиума по горению и взрыву: Черноголовка, Моск. обл., Россия, сент. 1992 г. – Черноголовка : ИСМ РАН, 1992. – С. 193-194.

26. Шрайбер О.А. Моделювання теплових та фізико-хімічних процесів у щільному шарі зернистого матеріалу / О.А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 27. – № 2. – С. 21-27.

27. Antony E.J., Grananstein D.L. Sulphatation phenomena in fluidized bed combustion Systems // Progress in Energy and Combustion Science. – 2001. – Vol. 27. – № 1. – P. 215-256.

28. Clabrorq R., Jensen A.D., Johnson I.E. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems // Progress in Energy and Combustion Science. – 2003. – Vol. 29. – № 1. – P. 89-113.

29. Майстренко А.Ю. Влияние концентрации СО на скорость взаимодействия потоков каменных углей с СО₂ в кипящем слое под давлением / А.Ю. Майстренко // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1997. – № 2. – С. 9-15.

30. Майстренко А.Ю. Кинетика взаимодействия коксов энергетических углей с газами-реагентами СО₂ и О₂ в кипящем слое под давлением / А.Ю. Майстренко // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1997. – № 3. – С. 3-10.

31. Майстренко А.Ю. Численное исследование влияния тепломассообмена на воспламенение и выгорание коксовой частицы в кипящем слое под давлением /



А.Ю. Майстренко, В.П. Пацков // V Минский международный форум по тепло- и массообмену 24-28.05.2004 : сб. тез. докл. – Минск : ГНУ «ИТМО им. А.В. Лыкова» НАНБ. – Т. 2. – С. 144-146; CD-ROM : труды V Минского межд.форума по тепло- и массообмену. – Минск : ГНУ «ИТМО им. А.В. Лыкова» НАНБ, 2004. – Секция 6. Теплообмен в дисперсных и реологических системах. – (файл – 6.21).

32. Пацков В.П. Вдосконалена методика статистичного оцінювання макрокінетичних параметрів газифікації коксів високозольного вугілля при підвищенні тисках / В.П. Пацков // Вопросы химии и химической технологии. – 2004. – № 3. – С. 180-185.

33. Вплив інертних частинок золи на теплообмін при горінні-газифікації окремих частинок високозольного кам'яного вугілля у киплячому шарі при підвищених тисках / О.Ю. Майстренко, В.П. Пацков, О.І. Топал та ін. // Металургійна теплотехніка : зб.наукових праць : у 2 кн. – Дніпропетровськ : Пороги, 2005. – Кн. 1. – С.115-134.

34. Майстренко А.Ю. Основные принципы математической обработки нестационарных кинетических кривых процессов термохимической переработки твердых топлив / А.Ю. Майстренко, В.П. Пацков, А.И. Топал // Горение твердого топлива : сб. окл. VI Всероссийской конференции (с участием иностранных ученых), Новосибирск. 8-10.11.2006 г. – Новосибирск : Изд. Ин-та теплофизики СО РАН, 2006. – Ч. 1. – С. 187-195.

35. Weimer A.W., Glough D.E. Modelling of low pressure steam-oxygen gasification in fluidized bed coal gasifying reactor // Chem.Eng.Sci. – 1981. – Vol. 36. – № 3. – P. 549–557.

36. Хмыров В.И. Конверсия оксида азота в пламени углеводородных топлив при двухступенчатом сжигании / В.И. Хмыров, В.О. Кроль, А.К. Склямбаева // ФГВ. – 1993. – Т. 29. – № 4. – С. 16–20.

37. Бабушок В.И. Глобальные кинетические параметры для высокотемпературных газовых реакций / В.И. Бабушок, А.Н. Дакданча // Там же. – С. 48–80. Guerin H., Dan-Johansen K., Wegel S. et al.

38. Review of the direct sulphatation reaction limestone // Progress in Energy and Combustion Science. – 2006. – Vol. 32. – № 1. – P. 386–407.

39. Пацков В.П. Численное моделирование процесса термохимической переработки высокозольного каменного угля под давлением в циркулирующем кипящем слое / В.П. Пацков // ФГВ. – 2002. – Т. 38. – № 2. – С. 11-20.

40. Числовий аналіз процесу «микрої» газифікації високозольного кам'яного вугілля у киплячому шарі при підвищених тисках / О.Ю. Майстренко, В.П. Пацков, О.І. Топал // Енергетика и электрификация. – 2004. – № 5. – С. 2-6.

41. Численный анализ процесса горения и газификации полидисперсного коксового остатка высокозольного каменного угля под давлением в кипящем слое/ В.П. Пацков, А.Ю. Майстренко, А.И. Топал, Т.В. Пацкова // ИФЖ. – 2007. – Т. 80. – № 5. – С. 160-171.

42. Кунии Д. Промышленное псевдооживление / Д. Кунии, О. Левеншпиль. – М. : Химия, 1976. – 448 с.

43. Бубенчиков А.М. Численное исследование характеристик неоднородного псевдооживленного слоя / А.М. Бубенчиков, А.В. Старченко // ИФЖ. – 1993. – Т. 65. – № 2. – С. 174-178.

44. Нигматуллин Р.И. Основы механики гетерогенных сред / Р.И. Нигматуллин. – М. : Наука, 1978. – 336 с.

45. Бубенчиков А.М. Математическое моделирование аэродинамики и тепло-массообмена в устройствах с циркуляционным кипящим слоем / А.М. Бубенчиков, А.В. Старченко, В.В. Стрopus // Теплоэнергетика. – 1995. – № 9. – С. 37-41.

46. Волков Э.Л. Системно-структурный анализ процессов в топке с кипящим слоем / Э.Л. Волков, М.И. Егай, Р.Ю. Шакарян // Топливоиспользование и охрана окружающей среды : сб. науч. тр. – М. : МЭИ, 1985. – Вып. 4. – С. 5-21.



47. Шемякин М.Н. Математическое моделирование процесса сжигания и газификации угля в кипящем слое / М.Н. Шемякин, В.Н. Орлик, К.И. Мишина // Химия твердого топлива. – 1986. – № 4. – С. 128–133.
48. Рохман Б.Б. Методика расчета и конструктивные особенности котлоагрегата с кипящим слоем / Б.Б. Рохман // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – № 2. – С. 68-74.
49. Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов / О.Левеншпиль. – М. : Химия, 1969. – 600 с.
50. Шрайбер О.А. Оптимізація процесу вигорання вугільних частинок у циркулюючому киплячому шарі / О.А. Шрайбер // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29. – № 4. – С. 64-72.
51. Рохман Б.Б. Математическое моделирование аэродинамики и физико-химических процессов в надслоевом пространстве топки с циркулирующим кипящим слоем. Основные уравнения аэродинамики / Б.Б. Рохман, А.А. Шрайбер // ИФЖ. – 1993. – Т. 65. – № 5. – С. 521-528; II. Взаимодействие частиц (псевдотурбулентность) // ИФЖ. – 1993. – Т. 66. – № 2. – С. 159–161; III. Граничные условия. Некоторые численные результаты // ИФЖ. – 1993. – Т. 66. – № 6. – С. 681–689; IV. Теплообмен и горение // ИФЖ. – 1994. – Т. 67. – № 1-2. – С. 37-46.
52. Рохман Б.Б. Двухзонная модель аэродинамики и теплообменных процессов в надслоевом пространстве топки котла с циркулирующим кипящим слоем / Б.Б. Рохман // Тепло-энергетика. – 2005. – № 9. – С. 35–43.
53. Рохман Б.Б. К моделированию процессов переноса в надслоевом пространстве топки парогенератора с циркулирующим кипящим слоем / Б.Б. Рохман // ИФЖ. – 2006. – Т. 79. – № 1. – С. 20–28.
54. Теплицкий Ю.С. Перемешивание частиц в установках с циркулирующим кипящим слоем / Ю.С. Теплицкий, А.Н. Ноготов // ИФЖ. – 2002. – Т. 75. – № 3. – С. 9-16.
55. Волков Э.П. Методы моделирования процессов горения твердых топлив в циркуляционных системах / Э.П. Волков, Л.И. Зайчик, В.А. Першуков // Химическая физика процессов горения и взрыва : тезисы X симпозиума по горению и взрыву, Черногловка, сент. 1992. – Черногловка : ИСМ РАН, 1992. – С. 193-194.
56. Gibbson M.M., Monahan I.H. A simple model of radiation heat transfer a cloud burning particles in a confined gas stream // Int.Journ.Heat and Mass Transfer. – 1971. – Vol. 14. – № 1. – P. 141-147.
57. Существующие методы оценки эффективности циклонных аппаратов (обзор) / В.П. Пацков, А.И. Топал, А.В. Крицкий, А.В. Корниенко // Промышленная теплотехника.- 2007. – Т. 29. – № 7. – С. 194-200.
58. Устименко Б.П. Численное моделирование аэродинамики и горения в топочных и технологических устройствах / Б.П. Устименко, А.Б. Джакупов, В.О. Кроль. – Алма-Ата : Наука, 1986.
59. Влияние гидродинамических характеристик на рабочие процессы в топках с циркулирующим кипящим слоем / Р.Ю. Шакарян, Ф.С. Бибииков, Б.К. Муканов и др. // Проблемы энергосбережения : межвед. науч. сб. тр. – Киев : Наукова думка, 1990. – Вып. 4. – С. 69-77.
60. Бородуля В.А. Масштабный переход в циркулирующем кипящем слое / В.А. Бородуля, Ю.С. Теплицкий // Теплообмен ММФ-96. III Минский международный форум по тепло- и массообмену. – Т. V. Тепло- и массообмен в дисперсных системах.– Минск : АНК «ИТМО им. А.В. Лыкова» НАНБ, 1996. – С. 60-72.
61. Андерссон Б.А. Экспериментальные методы определения тепло- и массообмена в котлах с циркулирующим кипящим слоем / Б.А. Андерссон, Б. Лекнер // Теплообмен. – 1992. – Т. 35. – № 10. – С. 3353–3362.



62. Чернявский Н.В. Оптимизация режимов работы и экологических показателей термоконтактного пиролизера энергоустановок с циркулирующим кипящим слоем / Н.В. Чернявский, С.Г. Дулиенко, Л.С. Гапонич // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 1998. – № 3. – С. 17-20.
63. Мунц В.А. Моделирование переходных процессов в котлах с циркулирующим кипящим слоем/ В.А. Мунц, Е.Ю. Павлюх // Сыромятниковские чтения. – 1998. – № 3. – С. 17-20.
64. Моделирование физико-химических процессов в топках с циркулирующим кипящим слоем / Б.Л. Кадников, Н.И. Давыдов, Г.А. Рябов и др. // Теплоэнергетика. – 1994. – № 5. – С. 67-70.
65. Кадников Б.Л. Моделирование режимов пуска и останова котлов с циркулирующим кипящим слоем / Б.Л. Кадников, Н.И. Давыдов, Б.Р. Плоткин // Теплоэнергетика. – 1995. – № 11. – С. 54-59.
66. Мунц В.А. Тепловой расчет топок со стационарным низкотемпературным и циркулирующим кипящим слоем / В.А. Мунц, А.П. Баскаков // Теплоэнергетика. – 1990. – № 1. – Ч. 1. – С. 74-77; № 4. – Ч. 2. – С. 72-75.
67. Балансовые термодинамические расчеты процессов горения и газификации углей в ЦКС под давлением / Дудник А.Н., Майстренко А.Ю., Онищенко С.В., Топал А.И. // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 1999. – № 6. – С. 19-30.
68. Баскаков А.Л. Котлы и топки с кипящим слоем / А.Л. Баскаков, В.В. Мацнев, Н.В. Распопов. – М. : Энергоатомиздат, 1996. – 325 с.
69. Кратность циркуляции в топках с циркулирующим кипящим слоем / В.А. Мунц, А.П. Баскаков, Ю.П. Федоренко, Ю.Г. Козлова // Теплоэнергетика. – 1990. – № 4. – С. 30-34.
70. A model for prediction of carbon combustion in circulated fluidized bed combustor / Adanez J., Diego L.F., Cayan P. et. al. // Fuel. – 1995. – Vol. 74. – № 7. – P. 044-1056.
71. Cu Yaping, Nin Chung Chan, Guan Xin Анализ скорости циркуляции в котлах с циркулирующим кипящим слоем // Xi'an ia ot daxue хуебао. – Journal Ji Atong Univ. – 1995. – Vol. 29. – № 2. – P. 54-64.
72. Corella J., Sanz A., Modelling circulating fluidized bed biomass gasifiers. A pseudo-rigorous model for stationare state // Fuel Processig Technology. – 2003. – Vol. 86. – № 10. – P. 1021–1053.
73. Pallares D., Jonsson F. Modelling of fluid dynamics in large scale circulating fluidized beds // Progress in Energy and Combustion Science. – 2006. – Vol. 32. – № 4. – P. 539-569.
74. Применение ЦКС-котлов в проектах ТЭС / Серант Ф.А., Русских Е.Е., Ноздренко Г.В. // V Всероссийская конференция: Горение твердого топлива. – Ч. 2. – 8-10.10 2006, Новосибирск, Россия. – Новосибирск : Ин-т теплофизики СО РАН, 2006. – С. 217-231.
75. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями: Монография / П.А. Щинников, Г.В. Ноздренко, В.Е. Томилов и др. – Новосибирск : Из. НГТУ, 2005.
76. Топырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л.С. Топырин. – М. : Энергия, 1978. – 180 с.
77. Ноздренко Г.В. Эффективность применения в энергетике КАТЭ'ка экологически перспективных энерготехнологических блоков электростанций с новыми технологиями использования угля / Г.В. Ноздренко. – Новосибирск : НЭТИ, 1992. – 180 с.
78. Исследование эффективности улавливания и возврата золы на установках с циркулирующим кипящим слоем / Рябов В.А., Фаломеев О.М., Шапошник Д.А. // Теплоэнергетика. – 2002. – № 8. – С. 18-24.