

Переработка сырья и ресурсосбережение

УДК 662.99:621.78

DOI: 10.33070/etars.3.2019.05

Костогриз К.П., канд. техн. наук, **Хвастухін Ю.І.**, докт. техн. наук, проф., **Орлик В.М.**, канд. техн. наук, **Собченко В.В.**, канд. техн. наук, **Максимук О.Б.**, канд. техн. наук

Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: tspgas@ukr.net

Розвиток технології термічної обробки дисперсних матеріалів

У статті містяться відомості про роботи відділу термічних гетерогенних процесів Інституту газу НАН України за останні десять років, присвячені розвитку наукових та технологічних основ термічної обробки дисперсних матеріалів. Обговорена проблема ефективного використання природних ресурсів у зв'язку із скороченням запасів викопних енергоносіїв при одночасному збільшенні їх попиту для забезпечення зростаючих потреб виробництва. Наведено результати робіт з математичного моделювання процесів термічної обробки дисперсних матеріалів: проведено детальне дослідження сумісного спалювання деревних частинок з природним газом з урахуванням основних стадій процесу, запропоновано методику якісного та кількісного аналізу процесу утворення діоксинів при високотемпературній переробці хлорвмісних відходів. Проведено оцінку можливостей використання карбонатних сорбентів для вловлювання сірчаних сполук. Виконано детальний математичний опис ендотермічного процесу випалу частинки вапняку при проходженні високотемпературної зони псевдозрідженого шару розігрітих інертних частинок. Розроблено технологію тристадійної обробки матеріалу в апаратах з псевдозрідженим шаром та конструкцію печі-поризатора, суміщену з рекуператором, яка є елементом енергозбереження. Описано створені та впроваджені технології у виробництві теплоізоляційних матеріалів з гідросилікатів, перліту, мінераловатних виробів та з утилізації вміщуючих олію відпрацьованих сорбентів. Наведено схеми, залежності технологічних параметрів, технічні характеристики та загальний вигляд впроваджених розробок. *Бібл. 27, рис. 10.*

Ключові слова: енергозбереження, псевдозріджений шар, теплоізоляційні матеріали, термообробка, барботажна піч, рекуператор, утилізація відходів.

Проблема ефективного використання природних ресурсів з кожним роком стає більш актуальною. Це пов'язано як із скороченням запасів викопних енергоносіїв при одночасному збільшенні необхідних енергоресурсів для забезпечення зростаючих потреб виробництва, так

і з суттєвим посиленням вимог до захисту оточуючого середовища від забруднення. Значний ресурс нетрадиційних джерел енергії становлять промислові та побутові відходи.

Оскільки здебільшого відходи — це різноманітна за властивостями та складом речо-

вина, якісна обробка яких є складною проблемою, що потребує застосування різних технологій з відповідним апаратурним забезпеченням. У відділі термічних гетерогенних процесів Інституту газу НАН України більше 50 років проводилися фундаментальні та прикладні дослідження з аеродинаміки псевдозрідженого шару (ПШ), тепло- та масопереносу, якісного спалювання палив, а також створення наукових засад розрахунку та конструювання апаратів з ПШ [1, 2]. Застосування специфічних особливостей псевдозрідженого шару дає можливість організувати ефективну термообробку дисперсних матеріалів, які складно обробити іншими способами. Для розробки технологій ефективно термічної обробки відходів наукові дослідження було спрямовано на розвиток вже існуючих наробок та пошук нестандартних рішень. У традиційній сфері виробництва теплоізоляційних заповнювачів та будівельних матеріалів роботи провадилися з метою зменшення собівартості продукції за рахунок використання некондиційної сировини, підвищення енергетичної ефективності технологічного процесу та отримання продукту з покращеними експлуатаційними властивостями.

Моделювання процесів термічної обробки дрібнодисперсних матеріалів

Лабораторні експерименти, пов'язані з визначенням параметрів процесу термообробки дрібнодисперсних матеріалів, ускладнені значними труднощами або неможливістю вимірювання цих параметрів на окремій частинці через її малі розміри. Стан сучасного розвитку комп'ютерної техніки дає можливість здійснити такі дослідження математичним моделюванням з подальшим уточненням параметрів моделі на базі фізичних експериментів. Така стратегія дає можливість відносно простими шляхами на перших стадіях розробки технології визначити границі можливих змін технологічних параметрів та уникнути помилок при проектуванні та підборі характеристик обладнання.

Істотне зростання вартості природного газу ініціює використання запасів відновлюваних нетрадиційних джерел енергії, одним з яких є деревні відходи. На базі математичного моделювання проведено детальне дослідження сумісного спалювання деревних частинок з природним газом з урахуванням основних стадій: розігріву, видалення вологи (сушіння), виділення та згорання летучих компонентів, горіння вуглецевого залишку частинки, що дає можливість визначити оптимальні умови організації цього процесу в

умовах обмеженого часу перебування твердої фази в реакційному об'ємі [3].

При поширеному термічному знешкодженні та утилізації відходів різного походження існує загроза утворення вторинних токсичних сполук, вплив яких на навколишнє середовище може перевершувати шкідливий вплив вихідних забруднювачів. Прикладом може бути утворення діоксинів та фуранів при переробці відходів, що вміщують хлор.

Стратегія термічної обробки таких відходів має складатися в правильному підборі технологічного режиму, включаючи початковий склад та температуру теплоносія, а також час перебування продуктів переробки в реакційній зоні у залежності від виду відходів. Створення відповідних технологій та апаратури можливо тільки при наявності надійних даних, що дають можливість з достатнім ступенем точності моделювати процеси утворення діоксинів та фуранів при різних умовах.

Однак наявні дані носять в основному описовий характер, іноді достатній для прийняття рішень у деяких практичних випадках, порівняних з тими, при яких були проведені експерименти. Для ситуацій, коли умови проведення того чи іншого процесу суттєво відрізняються від досліджених раніше, необхідно більш детальне розуміння процесів, що призводять до утворення зазначених сполук.

Недоліки інформації про процеси утворення діоксинів та фуранів пов'язані, головним чином, з труднощами та високою вартістю проведення необхідних натурних експериментів. Як можливий вихід із ситуації, що склалася, можна розглядати процедуру отримання необхідних даних за допомогою обчислювальних експериментів. Першим кроком у цьому напрямку може бути використання програмних комплексів, що дають можливість за допомогою термодинамічних розрахунків аналізувати рівноважний стан реакцій за різних умов їх проведення.

У даному випадку термодинамічний аналіз показав, що при врахуванні конденсованого вуглецю, який практично завжди утворюється у процесах термічної переробки відходів, це призводить до того, що діоксини та фурани не утворюються при будь-якому варіюванні вихідних розрахункових параметрів, що явно суперечить експериментальним даним [4].

Так, в літературі є дані про те, що присутність конденсованого вуглецю (дрібнодисперсних частинок сажі) не тільки не перешкоджає утворенню діоксинів та фуранів, а й у деякій мірі каталізує цей процес. Для усунення

зазначеного протиріччя в деяких роботах пропонується виключати конденсований вуглець при використанні програм термодинамічного розрахунку високотемпературних реакцій шляхом директивного переведу всього вуглецю у газову фазу.

На наш погляд, більш природне вирішення цієї проблеми може бути отримано, якщо взяти до уваги, що реальні процеси за участю газоподібних компонентів та конденсованого вуглецю слід розглядати як сукупність газозфазних (гомогенних) реакцій та гетерогенних реакцій, що проходять на поверхні частинок. При цьому тепло- та масообмін між цими групами реакцій здійснюється через приповерхневий шар на межі по розділу фаз за рахунок процесів теплопровідності, конвекції та дифузії, швидкість яких завжди залишається кінцевою. Дана обставина дає можливість обґрунтовано вважати, що перебіг гомогенних та гетерогенних реакцій розділений в часі, у силу чого розрахунок процесів у газовій фазі (не важливо, термодинамічний або з урахуванням кінетики) має здійснюватися за умови відсутності в ній вуглецю.

Іншим наслідком лімітуючого впливу приповерхневого шару на швидкості процесів тепло- та масообміну між фазами, а також інерційності процесу зміни температури кожної з фаз є те, що результуючі швидкості зміни параметрів обох фаз мають кінцеві значення, навіть якщо прийнято допущення про рівноважний характер протікання усіх реакцій, що враховуються в кожній з фаз. В останньому випадку можна говорити про квазістатичний характер протікання усіх реакцій, рівноважний стан яких у кожен момент визначається поточною температурою кожної з фаз та значеннями масообмінних потоків між ними. При цьому зберігається можливість використання наявних даних про кінетику окремих реакцій в кожній із фаз.

Зроблене припущення дає можливість користуватися знанням констант рівноваги реакцій, що враховуються при розрахунку поточного стану газової фази, використовуючи для цього систему алгебраїчних рівнянь, що відображають умови рівноваги та матеріального балансу. При цьому зміна температури газової фази описується диференціальними рівняннями, що відображає вплив внутрішніх джерел (стоків) тепла за рахунок протікання реакцій у газовій фазі та вплив процесів тепло- та масообміну між твердою та газовою фазами.

У той же час зміна параметрів твердої фази (температури, характерних розмірів частинок та ін.) описується диференціальними рівняннями, незалежно від того, враховується динаміка про-

тікання відповідних реакцій на поверхні частинок чи використовуються співвідношення, що відображають рівновагу таких реакцій. При високих температурах, коли реакції за участю твердої фази відбуваються у дифузійній області, можна без всіляких обмежень користуватися відповідними рівняннями. При низьких температурах, коли швидкість таких реакцій визначається кінетичною складовою та, відповідно, температурою твердої фази, використання умов рівноваги може призвести до значних похибок. У першу чергу це стосується тих реакцій, в яких рівновагу при низьких температурах зрушено в область вихідних продуктів. Запропонована методика якісного та кількісного аналізу процесу утворення діоксинів у процесі високотемпературної переробки хлорвмісних відходів в умовах надзвичайно високої вартості проведення натурних експериментів є досить ефективною при проектуванні установок знешкодження [5].

Україні взяла на себе зобов'язання виконати вимоги Директиви Європарламенту та Ради ЄС 2001/80/ЄС, суттєво знизивши викиди SO_x , тому наразі актуальним є завдання розробки технологій ефективного отримання дрібнодисперсного сорбенту для вловлювання сірки, оскільки такий сорбент в Україні не виробляється, а можливість використання будівельного вапна викликає великі сумніви.

У роботі [6] проведено оцінку можливостей використання карбонатних сорбентів для вловлювання сірки. Виконано детальний математичний опис ендотермічного процесу випалу частинки вапняку при проходженні високотемпературної зони псевдозрідженого шару розігрітих інертних частинок. Розроблено програмне забезпечення для проведення обчислювальних експериментів процесу кальцинації дрібнодисперсних частинок вапняку у псевдозрідженому шарі інертного зернистого матеріалу з метою отримання високореакційного сорбенту. Наведено динаміку зміни основних якісних показників сорбенту: пористості, питомої поверхні, їх маси залежно від часу перебування у високореакційній зоні при зміні основних технологічних параметрів (температури 900–1200 °С, початкових розмірів сировинного вапняку в можливому на практиці діапазоні їх змін та початкових параметрів) вихідних вапняків (початкової порозності $\epsilon_0 = 0,03-0,1$, діаметра пор $d_{\text{пор}} = 3,84-17$ нм)), результатом яких є досить повна картина перебігу процесу активації вапняку в псевдозрідженому шарі [7–9].

Отримані результати дають можливість на етапі проектування визначити оптимальне апа-

ратурно-технологічне оформлення процесу кальцинації у залежності від вихідних параметрів сировинного вапняку, що забезпечуватиме бажану якість вапнякового сорбенту в масштабах заданої потужності промислової установки.

Виробництво дрібнодисперсних теплоізоляційних матеріалів із гідросилікатів

Пористі дисперсні матеріали з неорганічної сировини такі, як керамзит, перліт, за останні роки дещо втратили свої позиції на ринку теплоізоляційних матеріалів, оскільки їх собівартість вище, ніж у органічних спінених матеріалів: поро- та пінопластів. Але спінені органічні матеріали програють їм у довговічності, екологічності, атмосферній та біологічній стійкості. Для підвищення конкурентної здатності заповнювачів із гідросилікатів було виконано роботи в напрямку вдосконалення технології їх виробництва.

Спучування частинки гідросилікатного матеріалу відбувається у момент, коли її поверхня приведена до розм'якшеного стану, який характеризується оптимальною в'язкістю, та при виділенні необхідних для розширення рівномірно розподілених газоподібних продуктів із середини частинки [10]. Однак при цьому виникає велика ймовірність утворення агломератів та злипання матеріалу під час спучення та на етапі охолодження готового продукту. Для попередження цих процесів було проведено дослідження реологічних властивостей гідросилікатного матеріалу та процесу його охолодження [11, 12].

Висока енергетична ефективність процесу досягається завдяки використанню схеми «перехресних потоків» в апаратах псевдозрідженого шару для взаємодії обробленого матеріалу з теплоносієм. Реалізувати таку схему можливо при інтенсивному спрямованому русі дисперсного матеріалу від входу до виходу з апарату ПШ, яке поліпшується нахилом газорозподільної решітки. Зворотне переміщення твердої фази має бути менше спрямованого потоку. Мірою цього переміщення є ефективна температуропровідність ПШ a_e ($m^2/год$ або cm^2/c), яка в горизонтальному напрямку в діапазоні чисел псевдозрідження 2–10 складає від 0,6 до 1,5 cm^2/c . При прийнятих у технологіях термообробки дисперсних матеріалів числах псевдозрідження 5–8 величина $a_e \approx 1 cm^2/c$, або 0,36 $m^2/год$ [13].

Для забезпечення функціонування апарату ПШ у режимі «реактора ідеального витіснення» необхідно виконання умови, що потужність апарату по сировині має складати, $kg/год$:

$$G_m = a_e \rho_m V H/L,$$

де ρ_m — питома вага матеріалу, kg/m^3 ; V — ширина робочої камери апарату, m ; H — середня висота псевдозрідженого шару, m ; L — довжина псевдозрідженого шару, m .

Так, наприклад, при висоті псевдозрідженого шару $H = 0,2-0,3 m$ та розмірах робочої камери $L \times B = (3 \times 1) m$ мінімальна потужність по піску для виконання зазначеної умови складає близько 200–800 $kg/год$.

Апарати ПШ, у яких використовується цей принцип, мають температуру відпрацьованого теплоносія нижчу за температуру матеріалу, що оброблюється, за рахунок чого досягається енергетична ефективність.

Відділом термічних гетерогенних процесів Інституту газу НАН України на основі наукових досліджень було розроблено технологію та обладнання виробництва гідросилікатних теплоізоляційних матеріалів [14]. Схема технології виробництва наведена на рис. 1.

На першому етапі здійснюється підсушка полідисперсного подрібненого вихідного матеріалу у сушарці 1, після чого він елеватором 19 подається у піч поризації 2. Дрібна фракція напівпродукту, що виноситься із сушарки, повертається в лінію через циклон 5. Спучування підсушеного матеріалу здійснюється у печі-поризаторі 2, тепло відпрацьованих газів використовуються для підігріву дуттьового повітря у

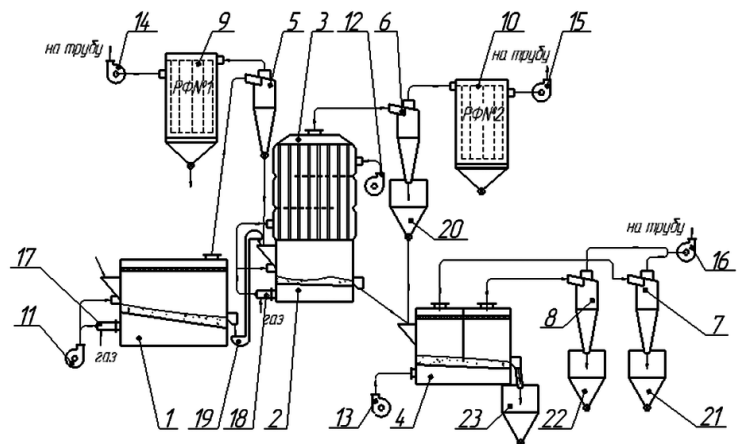


Рис. 1. Схема технології виробництва гідросилікатних теплоізоляційних матеріалів: 1 — сушарка; 2 — піч-поризатор; 3 — рекуператор; 4 — холодильник класифікатора; 5–8 — циклони; 9, 10 — рукавні фільтри; 11–13 — вентилятори; 14–16 — димососи; 17, 18 — теплогенератори; 19 — елеватор; 20–23 — бункери.

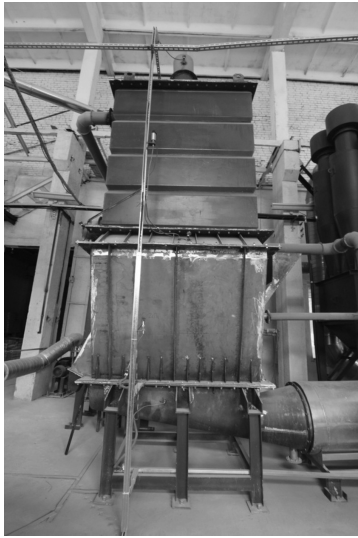


Рис.2. Піч-поризатор з рекуператором.

рекуператорі 3, який є частиною печі. Підігріте дуттєве повітря подається в теплогенератор печі 18. На наступному етапі поризований матеріал подається на охолодження та класифікацію у холодильник 4. Крупна фракція самопливом надходить у бункер 23. Середня та дрібна фракції після осадження у циклонах 7, 8 надходять у бункери 21, 22 відповідно.

Особливістю лінії є тристадійна обробка матеріалу в апаратах з псевдозрідженим шаром та конструкція печі-поризатора, суміщена з рекуператором, яка є елементом енергозбереження та дає можливість в одному апараті утилізувати теплоту відхідних газів без втрат теплоти у навколишнє середовище (рис.2). Нова конструкція печі забезпечує надійне рівномірне розподілення частинок оброблюваної сировини по поверхні псевдозрідженого шару та відсутність «мертвих» зон у порожнині корпусу з боку завантаження матеріалу [15].

Технологія виробництва спученого перліту з дрібнодисперсної сировини

Спучений перліт — це екологічно чистий, хімічно та біологічно стійкий легкий заповнювач широкого застосування. Сировиною для його виробництва є гідратовані вулканічні породи, які розповсюджені майже по всьому світу. Але в існуючих виробництвах зазвичай використовують фракціоновану сировину розміром більше 0,16 мм. Дрібнодисперсна пиловидна фракція, якої утворюється досить багато при видобуванні та первинній переробці руди, майже не використовується. Пов'язано це з тим, що за традиційними технологіями спучування перліту

здійснюється у шахтних печах з факельним спалюванням газу на двопровідних пальниках. При такій обробці частина матеріалу потрапляє безпосередньо у факел та подрібнюється за рахунок розтріскування. Інший матеріал, підхоплений потоком, недогрівається до необхідної температури, а тому недоспучується.

Вирішити проблему більш рівномірної обробки можливо за рахунок використання апаратів псевдозрідженого шару з інертним теплоносієм, у яких температура у шарі матеріалу, що обробляється, має високу рівномірність. Збільшення ККД процесу досягається спалюванням природного газу безпосередньо у псевдозрідженому шарі, що мінімізує втрати тепла. За рахунок високої інтенсивності теплопідводу до часток матеріалу, що обробляється, застосовується ефект «термоудару», що дає можливість спучити часточки матеріалу розміром у декілька десятків мікрон.

Для визначення технологічних параметрів було розроблено математичну модель процесу дегідратації дрібнодисперсних частинок у псевдозрідженому шарі інертних частинок, який псевдозріджується продуктами згоряння природного газу. На основі отриманого математичного опису розроблено математичне забезпечення, проведені обчислювальні експерименти по детальному дослідженню процесу дегідратації дисперсного матеріалу в псевдозрідженому шарі [16–18].

Практичну перевірку можливості реалізації процесу швидкісного спучування дрібнодисперсного матеріалу у псевдозрідженому шарі було здійснено на лабораторному стенді Інституту газу [19]. Досліди показали ефективність запропонованого способу спучування дрібнодисперсного матеріалу. Завдяки великій інтенсивності теплопід-



Рис.3. Установа для виробництва порожньотілих мікрокульок з перліту.

воду осклована поверхня спученої частки має вигляд майже ідеальної сфери — мікрокульки. Розроблений спосіб виготовлення дрібнодисперсного заповнювача у вигляді мікрокульок [20] було впроваджено на дослідно-промисловій установці ООО «Евросвіт», м. Миронівка, а також використано при розробці проекту реконструкції існуючого виробництва для ООО «Т. М. М.», м. Київ. Загальний вигляд печі для виробництва заповнювача наведено на рис.3.

Технічні характеристики установки наведено нижче:

Продуктивність за сировиною, кг/год	–	500
Продуктивність за готовим наповнювачем ($\rho_{\text{нас}} = 120 \text{ кг/м}^3$), м ³ /год	–	4
Витрата палива — природного газу, м ³ /год	–	31
Витрата повітря на дуття, м ³ /год	–	400
Об'єм димових газів, м ³ /год	–	5000
Встановлена електрична потужність, кВт	–	20

Енергетичне використання відходів олієпереробних заводів

Рафіновані олії, що виробляються в Україні, експортуються у понад 20 країн світу та попит на цю продукцію, якщо вона відповідає стандартам якості, зростає. В останні роки об'єми виробництва рафінованих олій перевищують 0,5 млн т/рік, при цьому на кінцевий продукт перероблюється не більше 10 % від загальних обсягів.

У технологічному процесі виробництва рафінованих олій утворюються насичені олією та парафинами відходи — відпрацьовані фільтрувальні матеріали. Вміст олій та парафінів у відпрацьованому матеріалі складає від 20 до 60 %. Великий маслпереробний комбінат може утворювати за рік більше 3 тис. т такого відходу. Цей відпрацьований сорбент має специфічну властивість самовільного розігріву та самозаймання завдяки окисленню жирів на розвинутій поверхні матеріалу, що суттєво ускладнює його складування та перевезення. Одним із шляхів вирішення проблеми утилізації відпрацьованих фільтрувальних матеріалів, що вміщують олію, могло б стати їх використання безпосередньо на самому олієпереробному підприємстві як вторинного паливного ресурсу.

В Інституті газу НАН України було проведено дослідження зразків відпрацьованих фільтрувальних матеріалів з метою вивчення можливості їх використання як паливного ресурсу [21].

Характеристики досліджених олієвміщуючих відпрацьованих фільтрувальних матеріалів: вміст вологи — 2–12 %; вміст олій та парафінів — 20–60 %; питома теплотворна здатність —

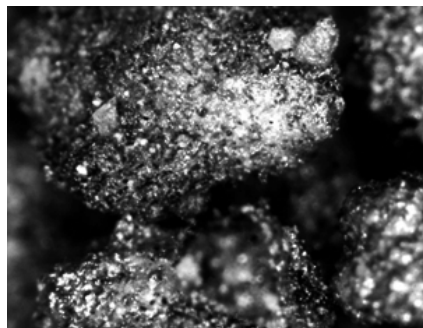


Рис.4. Осклована поверхня частинок відходу. $\times 200$.

7,5–23,5 МДж/кг; неорганічний залишок (SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , CaO) — 90–95 %.

Деякі з цих відходів за калорійністю наближаються до якісного кам'яного вугілля, яке має калорійність 27 МДж/кг, але безпосередньому спалюванню цього матеріалу у топці котла заважають три фактори: фракційний склад, низька температура шлакування та наявність високомолекулярних органічних сполук. Так, при спалюванні відбувалося шлакування з утворенням поверхневої скловидної оболонки на зразках вже при температурі 910 °С (рис.4), що перешкоджало випаленню органічних сполук із середини частинок матеріалу.

Фракційний склад матеріалу являє собою часточки розміром 1–20 мм, які дуже легко розсипаються на дрібний пил. Спалювання високомолекулярних сполук (похідних жирних кислот, восків та ін.) за традиційними технологіями призводить до утворення сажі. Дослідним шляхом було визначено незадовільне спалювання цих твердих відходів у нерухомому та у псевдозрідженому шарі. Якісну термічну утилізацію вдалося здійснити за технологією двостадійного спалювання з обортовим топковим пристроєм та циклонним допалювачем (рис.5).

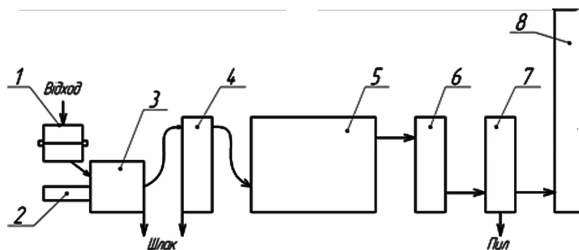


Рис.5. Функціональна схема лінії термічного знешкодження відпрацьованих фільтрувальних порошоків, що вміщують олію: 1 — бункер накопичувач; 2 — стартовий паливник; 3 — обортовий топковий пристрій; 4 — циклонний допалювач; 5 — котел-утилизатор; 6 — економайзер; 7 — фільтр; 8 — димова труба.

Технологію було впроваджено на ЗАТ «Іллічівський масложиркомбінат», м. Чорноморськ Одеської обл. Процес проходить у автотермічному режимі, лише на його початку необхідно використовувати стартовий паливник. Продукти спалювання використовуються для отримання технологічної пари у котлі-утилізаторі. Перед викидом в атмосферу димові гази охолоджуються в економайзері та очищуються від пилу у фільтрі тонкої очистки. Дослідно-промислова лінія термічної утилізації олієвміщуючих відходів під час експлуатації показала відповідність технічному завданню та задовольняла екологічним вимогам.

Технічні характеристики лінії наведено нижче:

Потужність по відходам, кг/год	–	500
Вміст органічної частини у відходах, %	–	30–50
Температура знешкодження, °С	–	850
Температура викидних димових газів, °С	–	130
Паропроductивність, т/год	–	1,5
Тиск пари, МПа	–	1,3

Виробництво мінераловатних виробів

За останнє десятиліття в Інституті газу тривали роботи щодо вдосконалення барботажних плавильних печей для отримання високотемпературного мінерального розплаву для мінераловатного виробництва. Огляд робіт попередніх періодів наведено у роботі [22].

У сучасних умовах для вироблення якісного мінерального волокна потрібен нагрів розплаву до температур близько 1550 °С. Наші дослідження показали, що у барботажній печі з

гарнісажною футеровкою та з температурою плавлення розплаву близько 1300 °С перегрів можливий тільки до 50 °С без значного зростання тепловтрат.

В Інституті газу виконано огляд різних способів підвищення температури розплавів мінеральних матеріалів, що отримують в традиційних печах та оцінено ефективність їх застосування на барботажних печах з гарнісажною футеровкою. Було розроблено математичну модель процесу плавлення частинки шихти у високотемпературній печі з зануреним горінням суміші природного газу та повітря. Для визначення темпу наростання на поверхні введеної у розплав частинки додаткового шару — гарнісажу — та швидкості плавлення результуючої частинки, що сформувалася в результаті даного процесу, використовується підхід, який гарантує дотримання у кожен момент часу балансу між кількістю тепла, що надійшло у частинку в результаті контакту з розплавом, та кількістю тепла, акумульованого частинкою поточного радіусу. Розроблено програмне забезпечення для розрахунку процесу плавлення частинок шихти різного розміру, що відрізняються за своїми теплофізичними параметрами та умовами теплообміну з розплавом [23].

На основі цього аналізу та з урахуванням власного досвіду розроблено конструкцію барботажної печі з двозонною плавильною ванною [24]. Одна зона обігрівується паливниками зануреної дії, має водоохолоджувані стіни, покриті гарнісажем, у ній відбувається плавлення шихти, а друга зона призначена для доведення температури розплаву до заданої по технології величини, обігрівується паливниками, встановленими над розплавом, та виконана з високоякісних вогнетривів. Схему печі представлено на рис.6.

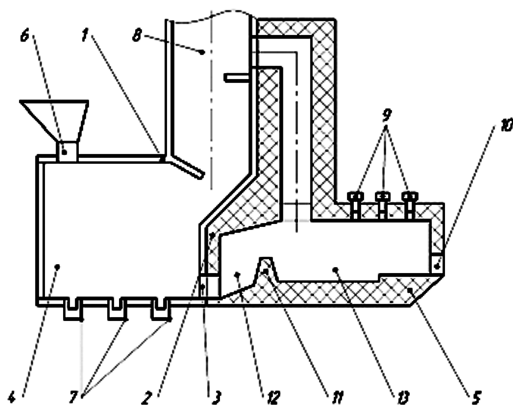


Рис.6. Схема печі з перегрівом розплаву: 1 — корпус печі; 2 — перегородка; 3 — перетік; 4 — плавильна ванна; 5 — под камери перегріву; 6 — вікно завантаження шихти; 7 — занурені паливники; 8 — димохід; 9 — паливник камери перегріву; 10 — випускне вікно; 11 — поріг перетоку; 12 — форкамера; 13 — камера перегріву розплаву.

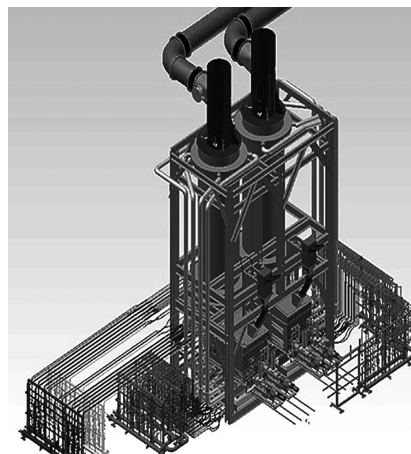


Рис.7. Загальний вигляд двохкорпусної барботажної плавильної печі.

На замовлення компанії «Сент-Гобен Ізовер» розроблено барботаажний плавильний агрегат у новому двокорпусному виконанні, з продуктивністю по 2,5 т/год розплаву на корпус, з водоохолоджуваними стіновими панелями, тиск води у панелях до 4 атм з наступним використанням тепла води. Піч виготовили, змонтували та пустили у роботу в м. Янбу (Саудівська Аравія). Піч зробили з зоною догріву розплаву, але з винесеним вузлом догріву та з кисневими пальниками. 3D збірка загального виду печі приведена на рис.7.

У результаті аналізу експериментальних даних, одержаних при дослідженні вогневих та гідравлічних моделей багатосоплового зануреного пальника, розроблена методика визначення області надійної роботи пальників у розплаві [25]. Основним критерієм, який визначає максимальне теплове навантаження пальника, є допустиме питоме навантаження стабілізаційної зони камери горіння. Розроблена методика визначення кількості горючої суміші, що поступає у стабілізаційну зону, та отримані залежності для розрахунку максимального навантаження на пальник. Визначена залежність глибини витіснення розплаву з камери горіння від кількості горючої суміші, яка поступає у пальник. Розроблені практичні рекомендації щодо вибору геометричних розмірів камери стабілізації пальників.

Для барботаажної зони печі у м. Янбу розроблено газоповітряні пальники вдосконаленої конструкції з покращенням змішуванням компонентів паливної суміші та розширеним діапазоном стійкої роботи [26]. Вдосконалений пальник зображено на рис.8, на рис.9 приведені його характеристики.

Раніше був вивчений теплообмін між мінеральним розплавом та водоохолоджуваними

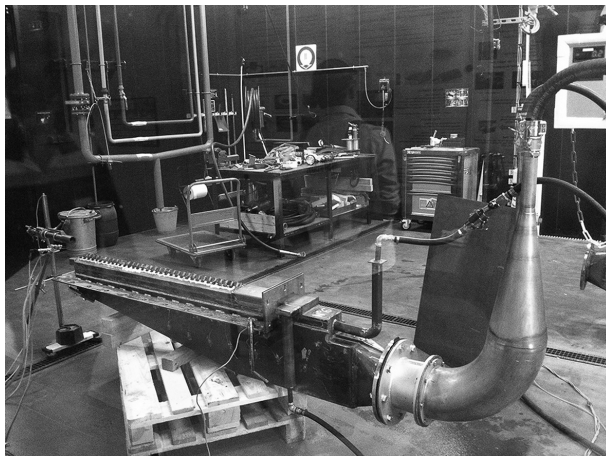


Рис.8. Вдосконалений газоповітряний заглибний пальник.

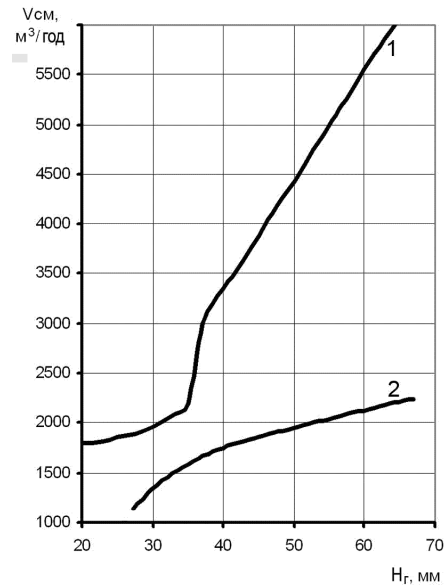


Рис.9. Залежність діапазону стійкої роботи (область між кривими 1 та 2) вдосконаленого пальника МПГ-П від глибини стабілізаційної зони ($L_{к.г.} = 0,9$ м; $D_c = 10$ мм; $S = 20$ мм; $V = 40$ мм; $T_{сум.} = 450$ °С; $H = 65$ мм): 1 – границя максимального навантаження по паливній суміші; 2 – границя мінімального навантаження.

стінками печі, розташованими нижче його рівня. Теплообмін зі стінками печі у надшаровому просторі має складну фізичну картину та не менш важливий для процесу в цілому.

Під час продування ванни мінерального розплаву продуктами горіння газоповітряної суміші у режимі барботаажу поверхня контакту фаз розплаву має площу приблизно на порядок більшу, ніж у неперемішуваному, спокійному стані. Барботаажні плюмажі виносять у надшаровий простір велику кількість бризок розплаву, які нагріваються та знову повертаються у розплав. Частина бризок потрапляє на стінки печі, де утворюється гарнісаж, що захищає стінки від впливу високотемпературних продуктів горіння. При безперервному наплискуванні крапель розплаву на стінки на них утворюється плівка розплаву, що стікає по поверхні назад у ванну. Нашими експериментальними дослідженнями на моделях та розрахунками встановлено, що, наприклад, для барботаажної печі з продуктивністю по розплаву 2,5 т/год при її роботі у номінальному режимі з запасом розплаву у ванні приблизно 4,5 т за 1 год роботи увесь розплав з ванни майже 1,5 рази перебуває у вигляді рухливої плівки на стінах печі. Таким чином встановлена важлива роль надшарового простору та «рухомого гарнісажу» у внутрішньому теплообміні, збільшенні надходжень тепла з надшарового простору у розплав.

Плавильні барботажні печі у технології переробки твердих побутових відходів

Подальший розвиток отримав перспективний напрям використання плавильних барботажних печей у технології переробки твердих побутових відходів (ТПВ) [27].

В Інституті газу розроблено комбінований метод двостадійного спалювання ТПВ. Розроблено технологічний комплекс продуктивністю 60 тис. т/рік, принципова схема якого представлена на рис.10. Робота сміттєспалювального комплексу передбачається у період опалювального сезону. В такому режимі найбільш ефективно використовується тепло від спалювання ТПВ, яке спрямовують на опалення житлових та адміністративних будівель, що більше ніж вдвічі ефективніше від вироблення електроенергії.

Використання способу двохстадійного спалювання ТПВ: на крокуючій подині, а потім допалювання горючого залишку та плавлення мінеральної частини у барботованому розплаві — дає можливість позбутися вторинних твердих відходів, які утворюються при традиційному спалюванні, та одержати розплав шлаку, що вміщує у собі оксиди важких металів. Отриманий скловидний матеріал придатний для використання у

будівництві. Розплавлений метал збирається на подині та періодично випускається з печі.

З метою утилізації прихованої теплоти випаровування наявної у ТПВ вологи (понад 50 %) передбачено встановити після водогрійного котла конденсаційний контактний водонагрівач та проміжний водоводяний теплообмінник для конденсації пари з димових газів та нагріву підживлювальної води системи гарячого водопостачання.

У результаті впровадження технологічного комплексу комбінованого способу двостадійного спалювання ТПВ впродовж роботи у період опалювального сезону (4000 год/сезон) додатково можливо отримати 51600 Гкал теплової енергії.

Одержаний шлак, що складається із силікатів та оксидів металів, застосовують у будівельній промисловості для виготовлення мінеральної вати та виробів з неї, наповнювачів для бетонних фундаментних блоків, при будівництві доріг та ін. Рідкий метал, що утворюється у розплаві, близький за складом до чавуну. Його можна використовувати для литва різних виробів або для подальшої переробки підприємствами чорної та кольорової промисловості.

Капіталовкладення у спорудження такого технологічного комплексу значно менші від тих, що потрібні для спорудження повномасштабного комплексу з паровою турбіною та генератором для вироблення електроенергії.

Висновки

Розвиток наукових та практичних основ термічної обробки дисперсних матеріалів, які були закладені у попередні роки, потрібний для вирішення сучасних технологічних проблем у різних сферах промислового виробництва. Математичне моделювання фізичних процесів, основане на використанні наявного наукового досвіду з подальшим уточненням параметрів моделі на базі фізичних експериментів, дає можливість з мінімальними витратами часу та фінансів визначити границі можливих змін технологічних параметрів та уникнути помилок при проектуванні та підборі характеристик обладнання.

Використання специфічних особливостей псевдозрідженого шару дає можливість організувати ефективну термічну обробку матеріалів, які раніше практично не використовувалися через складність або неефективність їх обробки існуючими технологіями. Приклади розробки та реалізації таких технологій з організацією обробки матеріалів у псевдозрідженому шарі

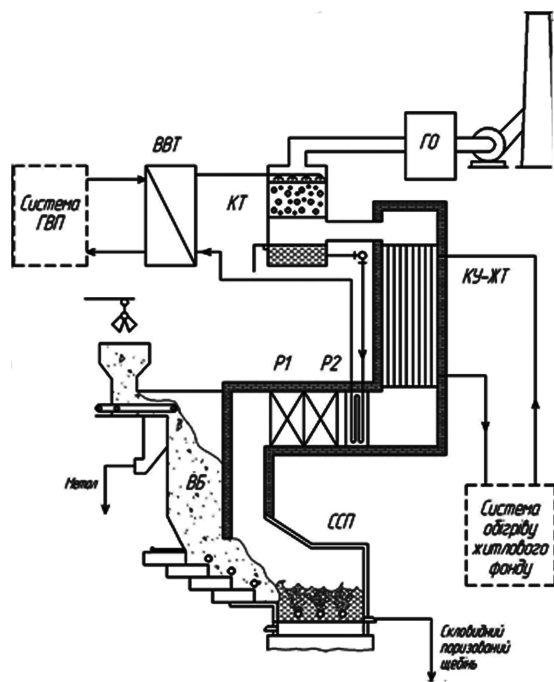


Рис.10. Схема технологічного комплексу комбінованого способу двостадійного спалювання ТПВ.

або шарі, що пересипається, наведено у статті. Наведено також результати робіт з розробки вдосконаленої барботаажної печі для отримання перегрітого розплаву.

Список літератури

1. Хвастухин Ю.И., Когута Н.К., Орлик В.Н., Кожан А.П. Развитие теории, техники и технологии псевдооживленного слоя. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 1999. № 3. С. 57–62.
2. Хвастухин Ю.И., Олабин В.М., Орлик В.Н. Энергосберегающие технологии слоевой термообработки дисперсных материалов. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2009. № 4. С. 42–51.
3. Карп И.Н., Колесник В.В., Орлик В.Н., Пьяних К.Е., Юдин А.С. Математическое моделирование процесса сгорания древесной частицы. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2010. № 5. С. 13–20.
4. Колесник В.В., Орлик В.Н., Олейник С. Ю., Россоха А.В. Термодинамический анализ процессов образования диоксинов. *Украинский химический журнал*. 2008. Т. 74, № 12. С. 78–82.
5. Колесник В.В., Орлик В.Н., Олейник С.Ю., Россоха А.В. Термодинамический анализ процессов образования фуранов. *Украинский химический журнал*. 2009. Т. 75, № 9–10. С. 99–102.
6. Колесник В.В., Орлик В.М., Жайворонок В.А. Термодинамічна оцінка використання карбонатних сорбентів в сухих методах десульфуризації димових газів. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2018. № 4. С. 29–34.
7. Колесник В.В., Орлик В.М., Хвастухин Ю.И., Костогряз К.П., Жайворонок В.А. Кальцинация дрібнодисперсного вапняку в псевдозрідженому шарі інертного зернистого матеріалу. 1. Математичний опис процесу кальцинації частинки вапняку. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2017. № 2. С. 49–58.
8. Колесник В.В. Орлик В.М., Хвастухин Ю.И., Костогряз К.П., Жайворонок В.А. Кальцинация дрібнодисперсного вапняку в псевдозрідженому шарі інертного зернистого матеріалу. 2. Результати обчислювальних експериментів. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 1. С. 45–49.
9. Kolesnyk V.V., Orlyk V.M., Zhaivoronok V.A., Kostohryz K.P., Sobchenko V.V. Numerical study of the process of calcinations small-grained limestone in a fluidized bed of inert granular material. *The IJES*. 2019. Vol. 8. P. 53–57.
10. Собченко В.В., Хвастухин Ю.И. Механизм поризации гидросиликатных материалов. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2005. № 1. С. 72–75.
11. Мурзак М.С., Собченко В.В., Степанюк А.Р. Дослідження реологічних властивостей гідросилікатного матеріалу. *Кераміка. Наука та життя*. 2017. № 1. С. 42–47.
12. Гапонюк М.М., Собченко В.В. Дослідження процесу охолодження частинок спученого сіоліту. *Кераміка. Наука та життя*. 2015. № 2. С. 10–13.
13. Хвастухин Ю.И., Костогряз К.П., Орлик В.Н., Колесник В.В. Особенности расчета аппаратов псевдооживленного слоя желобного типа для термообработки дисперсных материалов. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2011. № 1. С. 64–68.
14. Мурзак М.С., Собченко В.В. Перспективні шляхи створення високоякісних штучних пористих заповнювачів. XVI Міжнар. наук.-практ. конф. «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв», Одеса, 5–9 вересня 2016 р. Одеса : Одеська нац. академія харчових технологій, 2016. С. 234–236.
15. Пат. 116977 Укр., МПК F 27 В 15/00 (2017.01). Пристрій для термообробки сипких матеріалів у киплячому шарі. М.С.Мурзак, В.В. Собченко. Опубл. 12.06.2017, Бюл. 11.
16. Хвастухин Ю.И., Колесник В.В., Орлик В.Н., Цюпяшук А.Н. Математическое моделирование процесса дегидратации мелкодисперсных частиц в псевдооживленном слое инертных частиц. 1. Математическое описание процесса. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2011. № 6. С. 66–72.
17. Хвастухин Ю.И., Колесник В.В., Орлик В.Н., Цюпяшук А.Н. Математическое моделирование процесса дегидратации мелкодисперсных частиц в псевдооживленном слое инертных частиц. 2. Разработка математического обеспечения. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2012. № 3. С. 69–72.
18. Хвастухин Ю.И., Колесник В.В., Орлик В.Н., Цюпяшук А.Н. Математическое моделирование процесса дегидратации мелкодисперсных частиц в псевдооживленном слое инертных частиц. 3. Исследование параметрической чувствительности процесса. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2012. № 6. С. 55–58.
19. Хвастухин Ю.И., Костогряз К.П., Роман С.Н., Цюпяшук А.Н. Получение мелкозернистого легковесного наполнителя для ячеистых бетонов в псевдооживленном слое. *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. 2011. Вип. 40. С. 190–196.
20. Пат. 97065 Укр., МКИ С 03 В 19/10, С 04 В 14/14, 20/06. Спосіб виготовлення заповнювача будівельних матеріалів у вигляді мікрокульок. Ю.І.Хвастухин, К.П.Костогряз, С.М.Роман. № a201100966. Заявл. 28.01.2011. Опубл. 26.12.11, Бюл. 24.
21. Собченко А.А., Костогряз К.П., Хвастухин Ю.И., Роман С.Н. Использование отходов маслоработки в котельной масложирового предприятия. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2012. № 3. С. 44–48.
22. Олабин В.М. Исследование погружного сжигания газа и разработка барботаажных плавильных печей. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 1999. № 3. С. 63–69.
23. Колесник В.В., Олабин В.М., Орлик В.Н. Исследование процесса плавления частиц шихты в печи с погружным горением. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2015. № 2. С. 34–41.
24. Пат. 106830 Укр., МПК F 27 В 3/00, С 03 D 5/193, С 03 D 5/04. Барботаажна плавильна піч безперервної дії. О.Б.Максимук, В.М.Олабін. Опубл. 2013, Бюл. 24.

25. Максимук А.Б., Олабин В.М. Экспериментальные исследования гидравлической устойчивости работы многосопловой погружной горелки в режиме барботажа. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2012. № 1. С. 59–63.
26. Пат. на корисну модель 86112 Укр. МПК А 23 В 14/38 (2006.01). Занурений газоповітряний пальник. В.М.Олабін, О.Б.Максимук, І.В.Нікітіна, В.А.Жайворонок. Опубл. 10.12.2013, Бюл. 23.
27. Гречко А.В., Калинин Е.И., Денисов В.Ф. Переработка высоковлажных бытовых отходов в печи Ванюкова. Цветная металлургия. 1993. № 2. С. 16–19.

Надійшла до редакції 03.07.19

Костогряз К.П., канд. техн. наук,
Хвастухин Ю.И., докт. техн. наук, проф.,
Орлик В.Н., канд. техн. наук, **Собченко В.В.**, канд. техн. наук,
Максимук А.Б., канд. техн. наук
Институт газа НАН Украины, Киев
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: tspgas@ukr.net

Развитие технологии термической обработки дисперсных материалов

В статье содержатся сведения о работах отдела термических гетерогенных процессов Института газа НАН Украины за последние десять лет, посвященные развитию научных и технологических основ термической обработки дисперсных материалов. Обсуждена проблема эффективного использования природных ресурсов в связи с сокращением запасов ископаемых энергоносителей при одновременном увеличении их спроса для обеспечения возрастающих потребностей производства. Приведены результаты работ по математическому моделированию процессов термической обработки дисперсных материалов: проведено детальное исследование совместного сжигания древесных частичек с природным газом с учетом основных стадий процесса, предложена методика качественного и количественного анализов процесса образования диоксинов при высокотемпературной переработке хлорсодержащих отходов. Проведена оценка возможностей использования карбонатных сорбентов для улавливания сернистых соединений. Выполнено детальное математическое описание эндотермического процесса обжига частиц известняка при его прохождении высокотемпературной зоны разогретых инертных частиц псевдооживленного слоя. Разработаны технология трехстадийной обработки материала в аппаратах с кипящим слоем и конструкция печи-поризатора, совмещенная с рекуператором, которая является элементом энергосбережения. Описаны созданные и внедренные технологии в производство теплоизоляционных материалов из гидросиликатов, перлита, минераловатных изделий и по утилизации маслосодержащих и отработанных сорбентов. Приведены схемы, зависимости технологических параметров, технические характеристики и общий вид внедренных разработок. *Библ. 27, рис. 10.*

Ключевые слова: энергосбережение, псевдооживленный слой, теплоизоляционные материалы, термообработка, барботажная печь, рекуператор, утилизация отходов.

Kostohryz K.P., Candidate of Technical Sciences,
Hvastuhin Yu. I., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Orlyk V.M., Candidate of Technical Sciences,
Sobchenko V.V., Candidate of Technical Sciences,
Maksymuk O.B., Candidate of Technical Sciences
The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
 39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: tspgas@ukr.net

Development of Thermal Technology for Dispersed Materials Processing

The article contains information on the work of the department of thermal heterogeneous processes of the Institute of Gas of the NAS of Ukraine over the past ten years, devoted to the development of scientific and technological foundations for the thermal treatment of dispersed materials. The problem of the efficient use of natural resources in connection with the reduction of fossil energy resources while increasing their demand to meet the growing needs of production is discussed. The results of mathematical modeling of the heat treatment of dispersed materials are presented – a detailed study of the co-combustion of wood particles with natural gas is carried out taking into account the main stages of the process, a methodology for the qualitative and quantitative analysis of the process of dioxin formation during high-temperature processing of chlorine-containing waste is described. The possibilities of using carbonate sorbents for trapping sulfur compounds are evaluated. A detailed mathematical description of the endothermic process of calcining limestone particles during its passage through the high-temperature zone of the heated inert particles of the fluidized bed is carried out. The technology of three-stage processing of material in fluidized-bed apparatuses and the design of a reverting furnace combined with a recuperator, which is an element of energy conservation, have been developed. Created and implemented technologies in production of heat-insulating materials from hydrosilicates, perlite, mineral wool products. Schemes, dependencies of technological parameters, technical characteristics and general view of the implemented developments are given. *Ref. 27, Fig. 10,*

Key words: energy saving, fluidized bed, heat-insulating materials, heat treatment, bubble oven, recuperator, waste disposal.

References

1. Khvastukhin Ju.I., Koguta N.K., Orlik V.N., Kozhan A.P. [The development of the theory, technique and technology of the fluidized bed]. *Ecotechnologii i Resursosberezhenie. [Ecotechnologies and Resource Saving]*. 1999. No. 3. pp. 57–62. (Rus.)
2. Khvastukhin Ju.I., Olabin V.M., Orlyk V.N. [Energy-Saving Technologies of Layer Heat Treatment of Disperse Materials]. *Energotehnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2009. No. 4. pp. 42–51. (Rus.)
3. Karp I.N., Kolesnik V.V., Orlyk V.N., Pyanykh K.E., Yudin A.S. [Mathematical Modelling of a Wood Particle Combustion Process]. *Energotehnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2010. No. 5. pp. 13–20. (Rus.)
4. Kolesnik V.V., Orlik V.N., Olejnik S. Yu., Rossoha A.V. [Thermodynamic analysis of dioxin formation processes]. *Ukrainskij himicheskij zhurnal*. 2008. T. 74, No. 12. pp. 78–82. (Rus.)
5. Kolesnik V.V., Orlik V.N., Olejnik S. Yu., Rossoha A.V. [Thermodynamic analysis of furan formation processes]. *Ukrainskij himicheskij zhurnal*. 2009. t.75, No. 9–10. pp. 99–102. (Rus.)
6. Kolesnik V.V., Orlik V.M., Zhajvoronok V.A. [Thermodynamic Evaluation of the Using of Carbonate Sorbents in Dry Methods of Flue Gas Desulfurization]. *Energotehnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2018. No. 4. pp. 29–34. (Ukr.)
7. Kolesnik V.V., Orlik V.M., Hvastuhin Yu.I., Kostohryz K.P., Zhajvoronok V.A. [Calcination of Small-Grained Limestone in Fluidized Bed of Inert Granular Material. Part 1. Mathematical Description of Limestone Particle Calcinations Process]. *Energotehnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2017. No. 2. pp. 49–58. (Ukr.)
8. Kolesnik V.V., Orlik V.M., Hvastuhin Yu.I., Kostohryz K.P., Zhajvoronok V.A. [Calcination of Finely Dispersed Limestone in a Fluidized Bed of Inert Material. 2. Numerical Simulation Results]. *Energotehnologii i resursosberezhenie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2019. No. 1. pp. 45–49. (Ukr.)

9. Kolesnyk V.V., Orlyk V.M., Zhaivoronok V.A., Kostohryz K.P., Sobchenko V.V. Numerical study of the process of calcinations small-grained limestone in a fluidized bed of inert granular material. *The IJES*. 2019. Vol. 8. pp. 53–57.
10. Sobchenko V.V., Khvastukhin Yu.I. [About the Mechanism of Production of Porous Hydrosilicate Material]. *Energotehnologii i resursoberezhennie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2005. No. 1. pp. 72–75. (Rus.)
11. Murzak M.S., Sobchenko V.V., Stepanyuk A.R. [Investigation of the rheological properties of hydrosilicate material. *Keramika*]. *Nauka i zhizn*. 2017. No. 1. pp. 42–47. (Ukr.)
12. Gaponyuk M.M., Sobchenko V.V. [Investigation of the Cooling of Particles of Expanded Siolite. *Keramika*]. *Nauka i zhizn*. 2015, No. 2(27). pp. 10–13. (Ukr.)
13. Khvastukhin Yu.I., Kolesnik V.V., Orlyk V.M., Kostohryz K.P. [The Features of Fluidized Bed Apparatus of Trough Type Calculation for Disperse Materials Heat Treatment]. *Energotehnologii i resursoberezhennie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2011. No. 1. pp. 64–68. (Rus.)
14. Murzak M.S., Sobchenko V.V. [Prospective Ways to Create High Quality Artificial Porous Fillers]. *16th Mizhnarodna naukovo-praktichna konferenciya «Udoskonalennya procesiv ta obladnannya harchovih ta himichnih virobnictv»*, Odesa 5–9 veresnya 2016 r. Odesa : Odeska nacionalna akademiya harchovih tehnologij. 2016. pp. 234–236. (Ukr.)
15. Pat. 116977 Ukr., MPK F 27 B 15/00 (2017.01) [Device for heat treatment of bulk materials in a fluidized bed]. M.S.Murzak, V.V.Sobchenko. Publ. 12.06.2017. Bull. 11. (Ukr.)
16. Khvastukhin Yu.I., Kolesnik V.V., Orlyk V.N., Tsyupyashuk A.N. [The Mathematical Simulation of Fine-Dispersed Particles Dehydration Process in Inert Particles Fluidized Bed. 1. The Process Mathematical Model]. *Energotehnologii i resursoberezhennie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2011. No. 6. pp. 66–72. (Rus.)
17. Khvastukhin Ju.I., Kolesnyk V.V., Orlyk V.N., Tsyupyashuk A.N. [Mathematical modeling of the process of dehydration of fine particles in a fluidized bed of inert particles, Part 1. The mathematical description of the process]. *Energotehnologii i resursoberezhennie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2012. No. 3. pp. 69–72. (Rus.)
18. Khvastukhin Ju.I., Kolesnyk V.V., Orlyk V.N., Tsyupyashuk A.N. [Mathematical Simulation of Fine-Dispersed Particles Dehydration Process in Inert Particles Fluidized Bed. 3. The Process Parametric Sensitivity Investigation]. *Energotehnologii i resursoberezhennie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2012. No. 6. pp. 55–58. (Rus.)
19. Khvastukhin Yu.I., Kostohryz K.P., Roman S.N., Cyupyashuk A.N. [Obtaining fine-grained lightweight filler for aerated concrete in a fluidized bed]. *Budivelni materialy, virobi ta sanitarna tehnika. Naukovo-tehnichnij zbirnik*. 2011. Iss. 40. pp. 190–196. (Rus.)
20. Pat. 97065 Ukr., MKI C 03 B 19/10; C 04 B 14/14, 20/06. [A method of manufacturing a filler of building materials in the form of beads]. Hvastuhin Yu.I., Kostohryz K.P., Roman S.M. No. a201100966. Zayavl. 28.01.2011; Publ. 26.12.11, Bull. No. 24. (Ukr.)
21. Sobchenko G.O., Kostohryz K.P., Khvastukhin Yu.I., Roman S.M. [Reclamation of Waste Oil Refining Materials in a Steam-Boiler of Oils on Fats Factories]. *Energotehnologii i resursoberezhennie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2012. No. 3. pp. 44–48. (Rus.)
22. Olabin V.M. [Submersible gas combustion research and development of bubble melting furnaces]. *Ecotehnologii i Resursoberezhennie. [Ecotechnologies and Resource Saving]*. 1999. No. 3. pp. 63–69. (Rus.)
23. Kolesnyk V.V., Orlyk V.M., Olabin V.M. [Investigation of Furnace Charge Particles Melting Process in a Submersible Combustion Melter]. *Energotehnologii i resursoberezhennie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2015. No. 2. pp. 34–41. (Rus.)
24. Pat.106830 Ukr., MPK F 27 B 3/00, C 03 D 5/193, C 03 D 5/04. [Continuous bubbling melting furnace]. O.B.Maksimuk, V.M.Olabin. Publ. 2013. Bull. 24. (Ukr.)
25. Maksymuk O.B., Olabin V.M., Grigoriev O.A. [The Investigation of Hydraulic Operational Stability of Multinozzle Submerged Combustion Burner in Bubbling Regime]. *Energotehnologii i resursoberezhennie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2012. No. 1. pp. 59–63. (Rus.)
26. Pat. na korisnu model Ukr. 86112. MPK A 23 B 14/38 (2006.01) [Immersed gas-air burner] V.M. Olabin, O.B.Maksymuk, I.V. Nikitina, V.A. Zhajvoronok. Publ. 10.12.2013, Bull. No. 23. (Ukr.)
27. Grechko A.V., Kalinin E.I., Denisov V.F. [Recycling of high-humidity household waste in the Vanyukov furnace]. *Cvetnaya metallurgiya*. 1993. No. 2. pp.16–19. (Rus.)

Received July 3, 2019