

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КРИВОШЕЄВ СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 662.61

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВОЇ І ТВЕРДОЇ ФАЗ У ПИЛОГАЗОВИХ
ПОТОКАХ ВУГІЛЬНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК**

Спеціальність 05.14.06 – Технічна теплофізика
та промислова теплоенергетика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

КИЇВ – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті вугільних енерготехнологій НАН України.

Науковий керівник: академік НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Корчевой Юрій Петрович,
Інститут вугільних енерготехнологій НАН України,
почесний директор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Василенко Сергій Михайлович,
Державна наукова установа
Українського науково-дослідного інституту
цукрової промисловості,
директор;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Жовтянський Віктор Андрійович,
Інститут газу НАН України,
заст. директора.

Захист відбудеться „21” жовтня 2009 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.058.05 при Національному університеті харчових технологій за адресою: 01033, м. Київ, вул. Володимирська, 68. Корпус А, ауд. А-311.

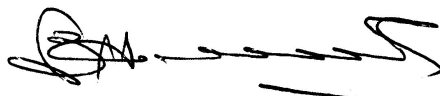
З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного університету харчових технологій за адресою: м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий „21” вересня 2009 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради К 26.058.05

кандидат технічних наук, доцент



В.М.Філоненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вугілля є єдиним органічним паливом, запасами якого Україна забезпечена на сотні років. Воно може розглядатися як головна енергетична база, достатня для забезпечення енергетичної незалежності країни. Спалювання вугілля забезпечує ~40% загального виробництва електроенергії, використовуючи розвинуту мережу шахт і пиловугільних електростанцій.

Проте, в останні 20 років умови роботи в твердопаливній енергетиці неухильно погіршуються, обладнання ТЕС морально та фізично застаріває, нестабільною є якість вугілля, що поставляється. Перелічене призводить до погіршення умов горіння палива, збільшуючи його механічний недопал і підвищуючи собівартість електроенергії. Разом з тим електростанції навіть не обладнані засобами безперервного контролю за процесом горіння, зокрема, за величиною недопалу, і персонал не може оперативним чином впливати на зміни в роботі обладнання.

Крім того, сучасні норми щодо вмісту шкідливих речовин у викидах до навколишнього середовища вимагають безперервного вдосконалення існуючих методів їх контролю з метою підвищення чутливості, точності й надійності вимірювань. Забезпечення шкідливих виробництв засобами вимірювання забруднень вимагають Закон України «Про охорону атмосферного повітря» та міжнародні зобов'язання держави.

Актуальність теми обумовлена необхідністю розробки нових та подальшого вдосконалення існуючих методів контролю за повнотою вигорання енергетичного вугілля в топках котлоагрегатів і величиною шкідливих викидів твердопаливних теплових електростанцій в навколишнє середовище. Такий контроль вимагає безперервного вимірювання основних параметрів пилогазового потоку – концентрації, функції розподілу за розмірами, швидкості, температури, вмісту залишкового вуглецю для частинок та швидкості, температури, концентрації компонентів для газової фази. Без знання цих параметрів аналіз процесів термічної переробки твердого палива та їх оптимізація неможливі.

Існуючі методи діагностики двофазних потоків або не забезпечують одночасне комплексне вимірювання вказаних параметрів для частинок, або не мають необхідної точності і чутливості. Наприклад, не існує методу вимірювання у реальному часі вмісту залишкового вуглецю у фракціях частинок в потоці. Тому задача створення нових автоматизованих технологій сучасного моніторингу пилогазових потоків, забезпечених відповідною вітчизняною приладовою і методичною базою, що дозволяє проводити надійні вимірювання широкого спектру параметрів, є важливою для вугільної теплоенергетики.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження та розробки, які є основою дисертації, виконувались в Інституті вугільних енерготехнологій НАН України в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: „Розробка методів діагностики та вивчення фізико-хімічних властивостей високотемпературних газових та газодисперсних середовищ енергоустановок” (1994–1997 рр. РК № 0196U008683) „Комплекс науково-дослідних робіт по розробці технології очищення димових газів і створенню методів діагностики процесу спалювання вугілля для енергетичних котлоагрегатів і парогазових установок на твердому паливі” (1996-2000 рр. РК № 0196U008679), "Розробка методів діагностики газових потоків в при-

сутності твердої фази та вивчення взаємодії нейтральних і заряджених компонент в полідисперсних системах” (1999–2001 рр. РК № 0100U002993), "Вивчення фізико-хімічних процесів в гетерогенних системах” (1999–2001 рр. РК № 0100U002996), „Аналіз властивостей і діагностика параметрів багатофазних гомогенних і гетерогенних середовищ” (2002–2006 рр. РК № 0102U001674), „Розробка методів та обладнання для діагностики параметрів енергетичного устаткування з метою підвищення надійності та подовження ресурсу вугільних енергоблоків та систем очищення промислових викидів” (2004–2006 рр. РК № 0106U000614), „Розроблення та виготовлення експериментального зразка криогенного адсорбційного модулятора газового потоку” (2006–2007 рр. РК № 0106U004955).

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка методів визначення та практичне вимірювання теплофізичних параметрів газової і твердої фаз пилогазових потоків, створення сучасних автоматизованих систем оперативного контролю за процесами термічної переробки палива для їх оптимізації у вугільних енергоустановах.

Для її реалізації були поставлені наступні задачі:

1. Розробка оптичного методу визначення параметрів частинок легкої золи: швидкості, розміру, концентрації, вмісту залишкового вуглецю, температури - в пилогазовому потоці димових газів у реальному часі для безперервного і безконтактного вихідного контролю за режимами термічної переробки твердого палива.
2. Створення установки для практичної реалізації оптичного методу визначення параметрів частинок, розробка методики роботи приладу та експериментальна перевірка працездатності, визначення його метрологічних характеристик.
3. Теоретичне обґрунтування роботи адсорбційного модулятора для підвищення чутливості і точності вимірювань мас-спектрометра.
4. Створення криогенного адсорбційного модулятора газового потоку до стандартного мас-спектрометра для контролю за концентрацією шкідливих викидів.
5. Розробка методів експрес-діагностики робочих середовищ вугільних енергоустановок за спонтанними флуктуаціями їх параметрів для оптимізації процесів горіння і газифікації твердого палива.

Ці задачі вирішувались із застосуванням **теоретичних методів опису:**

- а) процесу розсіювання лазерного випромінювання твердими частинками золи з урахуванням ефектів дифракції, відбиття і заломлення;
- б) кнудсеновської дифузії багатокомпонентного газу крізь капіляр при зміні температури його стінки і величини вхідного газового потоку;
- в) кореляційних властивостей спонтанних флуктуацій температур твердої та газової фаз хімічно активних нерівноважних середовищ

та експериментальних **методів дослідження** характеристик реальних і штучних модельних пилогазових потоків на лабораторних і технологічних установках, а також числових методів обробки результатів експериментів.

Об'єкт дослідження - робоче середовище вугільних енергоустановок, фізико-хімічний склад високотемпературного пилогазового потоку з частинками вугілля і золи.

Предмет дослідження - високотемпературний пилогазовий потік з частинками вугілля українських родовищ (антрациту і донецького газового), а також його коксо-зольними залишками.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Аналітично вирішена задача визначення інтенсивності розсіяного вперед лазерного випромінювання для частинок з діаметром, більшим за 20 мкм, з довільним коефіцієнтом заломлення і врахуванням просторового розподілу інтенсивності лазерного променя.
2. Вперше теоретично обґрунтовано і практично реалізовано комплексний метод одночасного визначення в реальному пилогазовому потоці таких фізичних параметрів твердих частинок золи, як їх розмір і вміст залишкового вуглецю у фракції.
3. Вперше аналітично вирішена задача опису динаміки дифузії газу в капілярі при довільній зміні температури поверхні та обґрунтована можливість застосування адсорбційного модулятора для підвищення чутливості та селективності мас-спектрометричного методу визначення малих концентрацій шкідливих домішок у димових газах.
4. Вперше експериментально методом флуктуаційної спектроскопії визначено параметри робочого тіла (температуру газу та енергію активації хімічної реакції) проточного реактора для спалювання та газифікації вугілля.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено метод та створено пристрій прямого вимірювання у реальному часі параметрів частинок золи, що мають діаметр, більший за 20 мкм (швидкість, розмір і концентрація) у поєднанні з визначенням вмісту в них залишкового вуглецю (по фракціях) в пилогазовому потоці.
2. Розроблено метод адсорбційної модуляції газового потоку та створено автоматизований пристрій для його реалізації, що дозволяють значно підвищити чутливість і селективність мас-спектрометричного способу визначення малих концентрацій домішок в газовому потоці.
3. Розроблено метод вимірювання температури частинок, що рухаються, в оптично нещільному пилогазовому потоці.

Результати досліджень та розробок використані: при створенні експериментального зразка автоматизованого мас-спектрометричного комплексу з адсорбційним модулятором газового потоку, технічна документація на який передана за ліцензійною угодою на завод «СЕЛМІ» по виробництву мас-спектрометрів (м. Суми); СПКТБ „Енергомашпроект” для розрахунків процесу горіння та масообміну при розробці конструкції котлоагрегатів киплячого шару продуктивністю 10–50 тонн пари на годину.

Особистий внесок здобувача. Автор особисто:

- математично обґрунтував оптичну методику визначення параметрів частинок в пилогазовому потоці та приймав участь у її практичній реалізації;
- приймав участь у розробленні методу та обробленні результатів експериментів по використанню адсорбційного модулятора газового потоку;
- приймав участь в розробленні і експериментальній перевірці методу визначення кінетичних характеристик хімічно активних середовищ (енергій активації реакцій) та параметрів їх стану (температур газу і частинок).

У наукових працях, що містять основні результати дисертаційної роботи, дисертанту, як співавтору, безпосередньо належать: [1,10] – розробка математичної моделі розсіювання частинкою лазерного випромінювання, участь у експериментальних дослідженнях, обробка результатів; [2,4,5] – участь у розробці математичної моделі дифузії газу в капілярі та експериментальних дослідженнях, обробка результатів; [3] – рішення задачі десорбції газу з капіляра за наявності паразитного об'єму на його вході; [6,7] – участь у розробці методу флюктуаційної діагностики хімічно активних середовищ, математичне обґрунтування та участь у експериментальному застосуванні методу для визначення кінетичних характеристик робочого середовища проточного реактора; [8,9] – розробка математичної моделі опису інтенсивності випромінювання оптично нещільного пилогазового потоку, що просвічується еталонним джерелом, участь у експериментальних дослідженнях, обробка результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на таких міжнародних і вітчизняних науково-технічних конференціях та семінарах: Всесоюзна конференція “Фізика і техніка монодисперсних систем” (Москва, 1988 р.); III Всесоюзна нарада по фізиці низькотемпературної плазми з дисперсною фазою, що конденсується (Одеса, 1988 р.); I Всесоюзний семінар “Оптичні методи дослідження потоків” (Новосибірськ, 1989 р.); 3-я Міжнародна науково-практична конференція „Вугільна теплоенергетика: проблеми реабілітації і розвитку” (Алушта, 2006 р.); ХУ Міжнародна конференція «Теплотехніка і енергетика в металургії» (Дніпропетровськ, 2008 р.).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 20 робіт, у тому числі: 4 статті в спеціалізованих наукових журналах України, 1 стаття у науковому журналі СРСР, 1 стаття в закордонному науковому журналі, 3 статті в збірниках праць, 4 авторські свідоцтва, 1 патент, 6 тез докладів в збірках праць вітчизняних науково-технічних конференцій і семінарів.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 167 сторінок, з них 110 сторінок основного тексту, 16 окремих сторінок містять 26 рисунків, список використаних джерел із 107 найменувань міститься на 11 сторінках, 7 додатків – на 30 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи і її зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета та задачі досліджень, визначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, надано інформацію про їх реалізацію, наведено відомості про особистий внесок автора, апробацію роботи, публікації по темі дисертації.

В першому розділі розглянуто основні існуючі оптичні методи визначення теплофізичних параметрів частинок і газу у пилогазових потоках. Для визначення функції розподілу частинок за розмірам (ФРЧР) найбільш поширеним є метод лазерної дифракції. За вимірним вектором значень інтенсивностей випромінювання, яке розсіяне під різними кутами θ_i , за допомогою матриці, зворотної до матриці розсіювання, знаходять ФРЧР у вигляді гістограми (вектора a_j). Даний метод визначення ФРЧР має одну перевагу – відразу визначається вся функція. Він добре себе зареко-

мендував при визначенні ФРЧР частинок малих розмірів із сталими оптичними властивостями. Проте полідисперсність, шорсткість, різна прозорість частинок легкої золи робить застосування методу лазерної дифракції в енергетиці проблематичним.

Найвдаліше рішення проблеми визначення більшості параметрів твердої фази в гетерогенних потоках реалізовано в приладі PCSV-P фірми Insitac Corporation. В приладі реєструється імпульс випромінювання, яке розсіяне частинками вперед при перетині лазерного променя. Оптична схема приладу побудована так, що в об'ємі реєстрації в кожний момент часу знаходиться одна частинка. Детектор випромінювання реєструє часовий профіль імпульсу і система реєстрації запам'ятовує його максимальне значення. За тривалістю фронту імпульсу визначається швидкість частинок, за їх числом за певний проміжок часу – концентрація. Відносна ФРЧР визначається рішенням зворотної задачі з розрахунком матриці розсіювання за теорією Мі.

Проте прилад має властивим більшості оптичних пристроїв контролю недолік - необхідність періодичного калібрування частинками з відомими оптичними властивостями, амплітуда імпульсів яких розраховувалася за теорією Мі. Також за допомогою цього приладу неможливо визначити прозорість частинок і вміст в них залишкового вуглецю.

Традиційний метод визначення вмісту залишкового вуглецю (ВЗВ) в частинках золи (контрольне спалювання) займає багато часу. Існуючі прилади для експресного аналізу недопалу (аналізатори ВЗВ фірми Mark & Wedell ASKETEKNIK ApS, Данія) вимагають калібрування при зміні фракційного складу та якості вугілля. Прилад не вимірює розподіл частинок за розмірами, що важливо для визначення причин виникнення недопалу.

В кінці розділу зроблено висновок, що не існує єдиної уніфікованої методики визначення всіх параметрів твердої фази: швидкості, концентрації, ФРЧР і ВЗВ, яка не потребує постійного уточнення метрологічних характеристик. Також виділені питання, що вимагають вирішення для розробки методів безперервного безконтактного вимірювання параметрів пилогазового потоку з використанням сучасних засобів діагностики, сформульовані мета та задачі дослідження.

В другому розділі обґрунтовано вибір типової оптичної системи (ОС) лазерного пиломіра (рис.1). Частинки пилогазового потоку в своєму русі вздовж осі ОУ перетинають сфокусований у перетяжку лазерний промінь, який спрямовано вздовж осі ОZ. Пряме випромінювання лазера відбивається дзеркалом. Розсіяне частинками світло збиральною лінзою (ЗЛ) фокусується на фотоприймач. Калібрована щілина формує такий об'єм реєстрації (ОР), звідки збирається розсіяне світло, що в ньому одночасно знаходиться тільки одна частинка потоку.

Виконано розрахунок параметрів різних ОС, що відрізняються конструкцією збиральної лінзи. В експериментах використовувались симетрична ОС (рис.1, симетрія довкола осі ОZ), ОС «два сектори» (прозорі верхній та нижній сектори ЗЛ з розхилом $\rho/3$) та асиметрична ОС (ЗЛ розташована під малим кутом до осі ОZ). Проаналізовані недоліки та переваги кожної ОС.

Для обраних ОС в наближенні Френеля аналітично вирішена задача математичного опису інтенсивності $I_d(x',y')$ дифракції випромінювання лазера на великих сферичних частинках (діаметр $2a > w_0 = 20$ мкм), які перетинають лазерний промінь у точці з координатами x_0, y_0 ($r_0^2 = x_0^2 + y_0^2$),

$$I_d = I_0 \exp(-(r_0^2 + a^2)/w_z^2) \{ 2 \operatorname{ch}(2a(y_0 y' + x_0 x')/r' w_z^2) - 2 \sin(2Ka r'/L) \} aL/2pKr'^3 \quad (1)$$

з урахуванням просторового розподілу інтенсивності лазерного випромінювання $I(x, y, z) = I_0 \exp(-(x^2 + y^2)/w_z^2)$, де $w_z = w_0 \{ 1 + (z/Kw_0^2)^2 \}^{1/2}$ - просторовий масштаб спадання інтенсивності випромінювання лазера в e разів на відстані z від перетяжки, L - відстань від перетяжки до збиральної лінзи, $K = 2\pi/\lambda$ - хвильовий вектор, λ - довжина хвилі випромінювання лазера, x', y' ($r'^2 = x'^2 + y'^2$) - координати довільної точки на лінзі.

Інтегрування виразу (1) по всій поверхні збиральної лінзи, звідки розсіяне випромінювання попадає на фотоприймач, дозволяє визначити потужність дифрагovanого випромінювання. З геометричної оптики отримані формули для потужностей відбитого частинкою вперед і заломленого нею (у разі прозорі частинки) випромінювань. Підсумовування одержаних виразів дозволило повністю визначити залежність потужності розсіяного світла $P(t)$ від параметрів частинки та її положення в ОР для кожної ОС. Наприклад, показано, що аналітична часова залежність потужності $P(t)$ світла, яке розсіяне непрозорою частинкою і реєструється фотоприймачем, при її русі $y_0 = u(t-t_0)$ в об'ємі реєстрації ОС «два сектори» виглядає як [10]

$$P(t) = C(a) \exp(-x_0^2/w_z^2) \{ \exp[-(u(t-t_0)+a)^2/w_z^2] + \exp[-(u(t-t_0)-a)^2/w_z^2] \}, \quad (2)$$

де $C(a)$ - коефіцієнт, що залежить від радіусу частинки і параметрів ОС, u - швидкість частинки, t_0 - час її перетину площини $y=0$.

Аналогічні вирази одержані і для прозорих частинок.

Знайдені рішення дозволили розробити оптичну методику визначення параметрів частинок, що рухаються, з аналізу залежності від часу інтенсивності розсіяного випромінювання. Експериментально вимірявши залежність $P(t)$, можна із її максимальної відповідності до моделі (2) знайти швидкість u та радіус a частинки. Кількість імпульсів світлорозсіювання за певний проміжок часу визначає концентрацію частинок у потоці (при відомому розмірі ОР). Показана можливість експрес-визначення шуканих параметрів за величинами моментних функцій сигналу (2), зроблено оцінки можливих похибок вимірювань.

Методика визначення вмісту залишкового вуглецю базується на залежності інтенсивності випромінювання, що розсіяне, від кута розсіювання, стану поверхні і показника заломлення частинки. В ході досліджень було реалізовано дві методики визначення ВЗВ – вимірюванням інтенсивності випромінювання, яке відбите частинкою назад, і вимірюванням інтенсивності схрещеного випромінювання, що розсіяне вперед.

При вимірюванні інтенсивності лазерного випромінювання, що відбите частинкою назад, ОС (рис.1) була доповнена ще однією збиральною лінзою та фотоприймачем для його реєстрації. Встановлено, що інтенсивність відбитого назад випромінювання істотно залежить від стану поверхні частинки. Оплавлені частинки золи, в основному, відбивають випромінювання назад дзеркально, а незгорілі частинки вугілля відбивають випромінювання дифузно.

Для великих частинок коефіцієнт відбиття $k_{\text{від}}$ - відношення інтеграла за часом потужності випромінювання $V(t)$, що відбите назад, до інтеграла потужності світла $P(t)$, що розсіяне вперед,

$$k_{\text{від}} = \int V(t) dt / \int P(t) dt, \quad (3)$$

головним чином залежить від властивостей поверхні (від типу відбиття – дифузне або дзеркальне), і практично не залежить від розміру частинки та місця перетину нею ОР. Експериментально встановлено, що для частинок вугілля і золи цей коефіцієнт суттєво відрізняється і може використовуватися для диференціації частинок.

Крім того показано, що часова залежність потужності випромінювання, що відбите назад, для випадків дифузного і дзеркального відбиття теж відрізняється. Цю відмінність можна використати для визначення ВЗВ, якщо розрахувати коефіцієнт кореляції потужностей випромінювань $V(t)$ та $P(t)$.

Для вимірювання інтенсивності схрещеного лазерного випромінювання, яке розсіяне вперед, ОС (рис.1) була доповнена фотоприймачем для його реєстрації та призмою Глана. Призма Глана була розташована за збиральною лінзою і розщеплювала розсіяне світло на два розділені промені, що мають взаємно перпендикулярну поляризацію. Поляризація одного променя співпадала з поляризацією лазерного випромінювання, поляризація другого була до неї перпендикулярна (схрещене випромінювання). Два фотоприймачі реєстрували інтенсивності кожного променя окремо.

Лазерне випромінювання поляризоване лінійно і інтенсивність схрещеного випромінювання дорівнює нулю. В результаті взаємодії падаючого випромінювання з поверхнею частинки (ефекти відбиття і заломлення) у випромінюванні, яке розсіяне вперед, з'являється схрещена складова поляризації. Як показали дослідження, її інтенсивність, головним чином, визначається уявною частиною коефіцієнта заломлення частинки, від якої залежить загальна інтенсивність заломленого випромінювання. Якщо частинка прозора, то інтенсивність заломленого випромінювання велика і, відповідно, велика інтенсивність схрещеного. Прозорість частинки, у свою чергу, сильно залежить від присутності у складі її речовини вуглецю. Цю відмінність можна використати для визначення ВЗВ, якщо розрахувати відношення потужностей звичайного $P(t)$ та схрещеного випромінювань $S(t)$

$$k_{\text{схр}} = \int S(t)dt / \int P(t)dt. \quad (4)$$

Ця величина не залежить від розміру частинки і місця її прольоту через ОР, але відрізняється для частинок вугілля і золи.

Необхідно підкреслити, що при визначенні ВЗВ використовуються інтегральні величини потужностей, які слабо чутливі до шумів.

В третьому розділі представлено результати дослідної перевірки розробленої оптичної методики визначення параметрів частинок. В модельних експериментах з використанням сферичних частинок відомого розміру отримано добре узгодження експериментальних даних з теоретичними, що дозволило оцінити метрологічні можливості методики (відносна похибка вимірювання розміру <5%, швидкості - <2%).

Експериментально виміряна ФРЧР в газоході димових газів установки по спалюванню твердого палива ВГП-100 ІВЕ НАН України [1]. Лазерний пилемір розміщувався безпосередньо на газоході, результати вимірювань одержані в реальному часі на протязі всієї тривалості роботи установки. Імпульси світлорозсіювання частинок легкої золи антрациту наведено на рис.2, сама експериментальна ФРЧР – на рис.3. Результати вимірювань добре узгоджуються з розрахунковими.

На створеному лазерному пилемірі оптичною методикою отримані імпульси світлорозсіювання частинок (рис.4) та ФРЧР легкої золи газоходів Трипільської [10] та Запорізької ТЕС.

Доведено, що за традиційною методикою лазерної дифракції (визначення розміру частинок за амплітудою імпульсу) коректні вимірювання неможливі. В леткій золі присутні як прозорі, так і непрозорі частинки, тож амплітуда сигналів від частинок одного розміру може відрізнятись на порядок. В той же час за часовою поведінкою імпульсу визначення розміру відбувається коректно. Експериментальні результати вимірювань ФРЧР леткої золи добре узгоджуються з даними по розсіюванню частинок на ситах.

Виконано експериментальну перевірку методики визначення ВЗВ у леткій золі газоходів Трипільської і Запорізької ТЕС різних фракцій з аналізу інтенсивностей відбитого назад та схрещеного випромінювань.

Для частинок леткої золи з різним ВЗВ вимірювалось відношення інтенсивності відбитого назад випромінювання до інтенсивності розсіяного вперед $k_{\text{від}}$ (формула (3)). Як видно з рис. 5 [10], розподіли частинок виносу і допаленої золи по $k_{\text{від}}$ суттєво відрізняються, але перетинаються в точці $k_{\text{від}}^*$ ($k_{\text{від}}^*=0,05$ для фракції 50-63 мкм). Знайдено експериментальні залежності частки частинок, що мають $k_{\text{від}} < k_{\text{від}}^*$, від ВЗВ, які виявились лінійними (наприклад, рис. 6). Знання такої калібрувальної залежності дозволяє за виміряною часткою частинок довільного потоку леткої золи даної фракції, що мають $k_{\text{від}} < k_{\text{від}}^*$, знайти вміст вуглецю в потоці, що досліджується. Калібрувальні залежності виміряні для кількох фракцій леткої золи Трипільської і Запорізької ТЕС.

Для частинок леткої золи з різним ВЗВ вимірювалось також відношення інтенсивності схрещеного випромінювання до інтенсивності звичайного $k_{\text{схр}}$ (формула (4)). Встановлено, що розподіли частинок виносу і допаленої золи по $k_{\text{схр}}$ суттєво відрізняються, проте перетинаються в точці $k_{\text{схр}}^*$ (своїй для кожної фракції леткої золи різного вугілля). Знайдено експериментальні залежності частки частинок, що мають $k_{\text{схр}} < k_{\text{схр}}^*$, від ВЗВ (рис. 7). Знання такої калібрувальної залежності дозволяє за виміряною часткою частинок довільного потоку леткої золи даної фракції, що мають $k_{\text{схр}} < k_{\text{схр}}^*$, знайти вміст вуглецю у цьому потоці. Калібрувальні залежності виміряні для кількох фракцій леткої золи Трипільської і Запорізької ТЕС.

В четвертому розділі представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень по удосконаленню мас-спектрометричного методу визначення концентрацій шкідливих домішок в димових газах. Блок-схема дослідного комплексу наведена на рис. 8.

Удосконалення методики вимірювань полягає в модуляції газового потоку, що поступає в іонізатор мас-спектрометра (МХ-7304А), за допомогою адсорбційного модулятора (АМ). Робоча поверхня модулятора (внутрішня поверхня металевого капіляра) в охолодженому стані селективно накопичує сполуки, що мають велику енергію адсорбції (NO_x , SO_2 та інші сполуки). Основні компоненти повітря накопичуються слабо через низьку енергію адсорбції. Періодично охолоджуючи і нагріваючи капіляр, можна модулювати потік домішок, що поступає в мас-спектрометр, одночасно збільшуючи амплітуду мас-спектрометричних ліній накопичених сполук при нагріванні капіляру. На рис. 9 приведені часові діаграми температури капіляра і іонного струму домішки, які ілюструють роботу приладу.

Використання АМ дозволяє періодично відстежувати величину фону і одночасно збільшити амплітуду корисного сигналу за рахунок накопичення. Наявність цих

переваг дозволяє значно підвищити чутливість комплексу і точність вимірювань.

Теоретичне обґрунтування методики і аналіз її можливостей приведені в роботі [5], де досліджена дифузія молекул, що адсорбуються, в капілярі при змінних у часі вхідному потоці $Q(t)$ і температурі робочої поверхні $T(t)$. Показано, що часово-просторовий розподіл повної концентрації $n(x,t)$ молекул (в об'ємі та адсорбованих на поверхні) в капілярі з радіусом r і довжиною L описується рівнянням дифузії

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_{kn}^* \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (5)$$

де $D_{kn}^* = 4r^2/3\phi^*$ - ефективний коефіцієнт дифузії, $\phi^* = \phi_v + \phi_s$, $\phi_v = 2r/v$ - характерний час прольоту молекул від стінки до стінки при середньоарифметичній тепловій швидкості v , $\phi_s = \phi_0 \exp(E_a/kT)$, E_a - енергія фізичної адсорбції, $\phi_0 \sim 10^{-13}$ с - період коливання молекули на поверхні стінки,

з граничними умовами

$$n(L,t) = 0 - \text{витікання газу у вакуум (} x=L \text{),}$$

$$\frac{\partial n}{\partial x} = -Q(t)/pr^2 D_{kn}^* = -q(t)/D_{kn}^* - \text{змінний потік газу на вході в капіляр (} x=0 \text{).}$$

Для даних граничних умов було отримане загальне рішення рівняння (5), що описує кнудсенівську дифузію газу через капіляр з урахуванням адсорбції на його поверхні при змінних температурі капіляра і потоці газу на вході. Це дозволило одержати аналітичний вираз, що описує часову поведінку десорбційного потоку газу в іонізатор мас-спектрометра при нагріві капіляру після накопичення молекул на протязі часу t_0

$$q_L(t) = [4pr^2/3L^2\phi^*(t)] \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} (2k-1) \exp(-\mu_k(\xi + \xi_0)) \int_0^{t_0} q(\xi) \exp(\mu_k \xi) d\xi, \quad (6)$$

де $\mu_k = (2k-1)^2$, $\xi = \int_0^t d\theta/\phi^*(i)$, $\phi^*(i) = 3\phi^*(i)L^2/p^2r^2$ - стала часу капіляра.

Аналіз виразу (6) показує, що на етапі накопичення капіляр є ємністю. Він усе-рештє флюктуації вхідного потоку за час накопичення t_0 і дозволяє на етапі десорбції визначити інтегральну потужність викидів компонентів, що аналізуються.

Слід відзначити, що отриманий вираз сталої часу капіляру дозволяє робити оцінки швидкості дифузії сполук по капілярам (порам) при наявності адсорбції. Наприклад, якщо відомі характерні розміри капілярів (пор) та енергія адсорбції сполуки, то можна визначити, при якій температурі відбудеться швидке зростання виходу легких ($\phi_v(T) = \phi_s(T)$). Це дозволяє розрахувати час та інтенсивність виходу легких з пористої структури вугільних частинок при їх нагріванні.

В ході експериментальних досліджень роботи АМ використовувався нікелевий капіляр ($r=0,42$ мм, $L=0,5$ м), температура якого контролювалась термпарою. Газовий потік, що постував в модулятор і далі в іонізатор мас-спектрометра, регулювався за допомогою двоканальної системи напуску з малим паразитним об'ємом (ПО). Це дозволяло напускати в капіляр або газ, що досліджується, або калібрувальну суміш з контрольованим вмістом домішки. Експериментальні дослідження показали [2], що метод визначення концентрації малих домішок у газовому потоці за допомогою АМ добре зарекомендував себе при аналізі вмісту таких з'єднань, як CF_4 , N_2O , NO_x , SO_2 , дозволяючи при часі накопичення 2-4 хвилини отримати значне збіль-

шення чутливості і селективності мас-спектрометричного комплексу. Наприклад, при часі накопичення $t_0 = 300$ с забезпечується межа виявлення $\text{SO}_2 \sim 10$ ppm.

На рис. 10 приведені десорбційні криві для калібрувальних сумішей при температурі накопичення $T_0 = 295$ К, часі накопичення $t_0 = 120$ с та швидкості нагрівання $S = 10$ К/с. Аналіз даних показав затягування заднього фронту десорбційного піка в порівнянні з розрахованим за формулою (6), що обумовлено наявністю ПО на вході в капіляр. В роботі [3] розроблено уточнену математичну модель процесу десорбції і результат розрахунків наведено на рис 10. Як змінний параметр в процедурі мінімізації відхилю між експериментальними і обчисленими даними використовувалась енергія адсорбції, яка була визначена, наприклад, для SO_2 $E_a = 64$ кДж/моль.

Накопичений досвід використання АМ дозволив створити експериментальний зразок повністю автоматизованого мас-спектрометричного комплексу з криогенним АМ газового потоку [4]. Використання криогенних температур при накопиченні домішки дозволило вимірювати концентрації сполук із значно меншою, ніж у SO_2 і NO_x , енергією адсорбції (наприклад, CO_2).

В п'ятому розділі представлено результати досліджень по визначенню температури газу і частинок по флуктуаціях випромінювання пилогазового потоку.

Об'єктом досліджень по відпрацюванню методики кореляційної спектроскопії [6] – нерівноважною хімічно активною системою – було обрано потік диоксиду вуглецю з частинками вугілля. Одержання горючого монооксиду вуглецю в процесі газифікації відбувається в результаті реакції $\text{C} + \text{CO}_2 + Q_r \rightarrow 2\text{CO}$, де Q_r - тепловий ефект реакції.

Реакція газифікації носить ендотермічний характер і необхідне тепло надходить на поверхню частинки за рахунок променистого теплообміну із стінками газифікатора, температура якого T_w підтримується сталою, а також за рахунок конвективного теплообміну з нагрітим газом. Вважається, що гетерогенна реакція газифікації відбувається безпосередньо на поверхні частинки, а продукт реакції переходить в газову фазу, не збираючись біля поверхні (кінетичний режим газифікації). Температура газу визначається швидкістю конвективного теплообміну із частинками і стінками реактора. Для вибраної моделі рівняння, які визначають температури частинок T_p і газу T_g , мають вигляд

$$\begin{aligned} \frac{dT_p}{dt} &= -6 \frac{\alpha_p}{c_p \rho_p d} (T_p - T_g) - \frac{6\epsilon\sigma}{c_p \rho_p d} (T_p^4 - T_w^4) - 6 \frac{\tilde{R}Q_r}{c_p \rho_p d}, \\ \frac{dT_g}{dt} &= 6 \frac{\alpha_p}{c_g \rho_g d} (T_p - T_g) \frac{\rho_p^*}{\rho_p} + \frac{4\alpha_w}{c_g \rho_g L} (T_w - T_g) \end{aligned} \quad (7)$$

де b_p , b_w - коефіцієнти конвективного теплообміну частинка-газ та стінка-газ; d , L - характерні розміри частинки і газифікатора; c_p , c_g , ρ_p , ρ_g - густина і питомі теплоємності вугілля та газу; ρ_p^* - насипна густина частинок; E_a - енергія активації реакції газифікації, $\text{Ш} = 0,273 c_g k_0 \exp(-E_a/RT)$.

Вважаючи флуктуації температури компонентів малими у порівнянні із стаціонарними значеннями ($dT_j \ll T_{j0}$) ($j=p, g$), після підстановки $T_j = T_{j0} + dT_j$ у (7), можна отримати систему лінеаризованих рівнянь для флуктуацій температур dT_p і dT_g . Рішення цієї системи рівнянь визначає релаксацію в часі флуктуацій температур газу і частинок.

Для опису часової поведінки флуктуацій використовується математичний апарат кореляційних функцій, які відображають ступінь стохастичного зв'язку випадкової величини в різні моменти часу. Вирази для часових кореляційних функцій (КФ) флуктуацій температури газу і частинок, які можна отримати з рішення системи рівнянь (7), мають вигляд [7]

$$K_{ij}(\phi) = \langle \Delta T_i(t) \Delta T_j(t+\phi) \rangle = S_{1ij} \exp(-\phi/\phi_1) + S_{2ij} \exp(-\phi/\phi_2), \text{ де } j=p,g. \quad (8)$$

Сталі часу ϕ_1 і ϕ_2 залежать від всіх параметрів, що входять до системи рівнянь (7), в тому числі від значення стаціонарної температури газу T_{g0} і енергії активації E_a реакції газифікації. Тому експериментальне вимірювання КФ флуктуації температури газу і частинок дисперсної фази і визначення характерних часів їх зміни ϕ_1 і ϕ_2 дозволяє розрахувати значення T_{g0} та E_a .

Кореляційний метод визначення температури газу і енергії активації реакції газифікації газодисперсного потоку експериментально перевірявся на установці «Температура» (рис. 11).

Установка складається з двох електричних трубчастих печей СУОЛ 0.4/25 (максимальна температура $T_w=1600$ К), в середині яких розміщувалась корундова трубка діаметром 34 мм, яка була реактором-газифікатором. Одна з печей слугувала для попереднього нагріву газу. Для цього в середині реактора в зоні печі підігріву насипався керамічний порошок. Потік газу-реагенту, проходячи крізь порошок, набував температури, близької до температури стінок реактора, і поступав в зону реакції - зону нагріву другої печі. Для подачі вугільного пилу в зону реакції в центрі печі розміщувалась керамічна трубка діаметром 12 мм. Вугільний пил з бункера-накопичувача під дією вібратора поступав в ежектор, підхоплювався потоком газу і через нагріту керамічну трубку попадав до зони реагування, де потоки газу і пилу перемішувалися. Діоксид вуглецю надходив з газового балона через редуктор, що виключало пульсації його потоку. Витрата газу-реагенту визначалась по ротаметру РТ-5, витрата вугільного пилу - контрольними зважуваннями маси вугілля.

Для реєстрації випромінювання із зони реакції в стінці реактора був зроблений крізний отвір, через який світловий потік по керамічних трубках діаметром 8 мм, розташованим перпендикулярно осі реактора, потрапляв на фотоприймач. Конструкція оптичної системи дозволяла виключити фонове випромінювання нагрітої стінки реактора. Місце розташування отвору вибиралося з умови квазістаціонарності процесів, що відбуваються в точці спостереження. Фотоприймачем слугував фотодіод ФД-24КК з низьким рівнем шумів. Електричний сигнал з навантаження фотодіода через підсилювач переводився в цифрову форму і поступав на ПЕОМ, де, після визначення характерних часів зміни АКФ ϕ_1 і ϕ_2 , розраховувалися значення стаціонарної температури газу T_{g0} і енергії активації E_a реакції газифікації.

Показано, що для оптично щільного газувугільного потоку вид автокореляційної функції (АКФ) флуктуацій інтенсивності випромінювання співпадає з видом АКФ флуктуації температури його компонентів. АКФ флуктуації інтенсивності випромінювання вугільної газосуспензії в процесі газифікації частинок антрациту фракції 100-160 мкм в потоці вуглекислого газу вимірювалась при концентрації частинок $n_p=40$ см⁻³. Температура стінок реактора контролювалась термпарою і підтримувалась на рівні $T_w=1500$ К. Температура вугільних частинок визначалась по стандартній методиці колірної пірометрії пірометром ПОВ-80.

Графік нормованої на дисперсію АКФ флуктуацій інтенсивності випромінювання високотемпературного хімічно активного пилогазового потоку $g(\phi)$, який отримано в результаті виконання експерименту, представлений на рис.12 для двох масштабів часу ϕ .

В результаті експериментальних досліджень було виміряно характерні часи зміни АКФ $\phi_1=18$ мс і $\phi_2=1,33$ с та визначено стаціонарну температуру газу та енергію активації реакції газифікації.

У підрозділі 5.2 математично обґрунтовано та експериментально перевірено метод визначення яскравісної температури частинок, що горять у пилогазовому потоці, з аналізу флуктуацій випромінювання потоку, що просвічується еталонним джерелом.

Якщо просвітити потік палаючих частинок (інтенсивність випромінювання кожної I_i) еталонним джерелом (ЕД) світла з інтенсивністю I_0 , то на фотоприймач попаде світловий потік $\Phi(t)$, що складається з власного випромінювання частинок та непоглиненого ними світла від ЕД. Одержано вирази для статистичних характеристик потоку $\Phi(t)$ - його дисперсії $m_2(\Phi)$ та третього центрального моменту (ТЦМ) $m_3(\Phi)$ - при довільних розподілах числа частинок у полі зору фотоприймача N та їх розмірів [8]

$$m_2(\Phi) = (\langle I_i \rangle - I_0)^2 [\langle s^2 \rangle m_2(N) + \langle N \rangle m_2(s)] + \langle N \rangle \langle s \rangle^2 m_2(I_i), \quad (9)$$

де $\langle A \rangle$, $m_2(A)$, $m_3(A)$ - середнє значення, дисперсія та ТЦМ величини A , s - площа поперечного перерізу частинки.

Математичний вираз для величини ТЦМ $m_3(\Phi)$ складний, проте сильно спрощується, якщо потік частинок є стаціонарний пуассонівський (частинки рухаються незалежно, потік оптично нещільний, $\langle A \rangle < 10$) [9]

$$m_3(\Phi) = \langle N \rangle \langle s^3 \rangle [(\langle I_i \rangle - I_0)^3 + 3(\langle I_i \rangle - I_0)m_2(I_i) + m_3(I_i)]. \quad (10)$$

З аналізу виразів (9) та (10) виходить, що величина $m_2(\Phi)$ має мінімум при $\langle I_i \rangle = I_0$. За цим критерієм можливе визначення яскравісної температури частинок $\langle T_i \rangle = T_0$ - треба змінювати температуру каліброваного ЕД до досягнення мінімуму величини $m_2(\Phi)$. Якщо вважати, що розподіл інтенсивностей I_i симетричний $m_3(I_i) = 0$, то аналогічно змінюючи температуру ЕД T_0 , що калібрується заздалегідь, до моменту, коли $m_3(\Phi) = 0$, можна визначити яскравісну температуру частинок $\langle T_i \rangle = T_0$.

Експериментальна перевірка методу виконувалась на установці «Температура». Подача вугільного пилу і підігрітого повітря здійснювалася способом, аналогічним до описаного в підрозділі 5.1. У відсутності частинок через оптичне вікно крізь об'єм реактора на фотоприймач (фотодіод ФД-24КК) потрапляло випромінювання ЕД - банд-лампи КГМ12-100. Величина електричного струму ЕД, що визначає його температуру, регулювалася стабілізованим джерелом живлення СИП-35. Калібрування температури ЕД проводилося заздалегідь яскравісним пірометром ПОВ-80.

Фокусуюча лінза формувала зображення 1:1 нитки накалювання ЕД на вісь реактора, де рухалась основна частина палаючих частинок. Під час свого руху частинки закривали частину зображення нитки накалювання, зменшуючи світловий потік від ЕД, але компенсували цей збиток власним тепловим випромінюванням. Сумарний світловий потік фокусувався збиральною лінзою на фотоприймач.

Типові результати вимірювань при горінні частинок антрациту (фракція 100-160 мкм) зображені на рис. 13. Середнє число частинок в полі зору фотоприймача складало $\langle N \rangle \sim 3$ і регулювалось напругою на вібраторі вугільного бункера.

В кінці підрозділу виконано оцінки відносної похибки визначення температури частинок.

ВИСНОВКИ

1. В дисертаційній роботі на підставі результатів досліджень розсіяння лазерного випромінювання коксозольними частинками, флуктуацій інтенсивності випромінювання високотемпературного пилогазового потоку і мас-спектрометрії димових газів розроблені методи визначення і практично виміряні теплофізичні параметри газової і твердої фаз пилогазових потоків (димових газів і робочих середовищ реакторів), що забезпечує рішення важливої науково-прикладної задачі – створення сучасних автоматизованих систем оперативного контролю за процесами термічної переробки палива для їх оптимізації у вугільних енергоустановках.

2. Аналітично вирішена задача дифракції лазерного випромінювання на великих ($d > 20$ мкм) сферичних непрозорих частинках в наближенні Френеля з урахуванням розподілу інтенсивності випромінювання лазера за законом Гаусса.

3. На основі отриманого рішення розроблено, теоретично обґрунтовано і експериментально перевірено метод прямого вимірювання фізичних параметрів великих частинок (швидкість, рахункова концентрація і розмір) в пилогазовому потоці по інтенсивності розсіяного вперед лазерного випромінювання. Розрахована оптична система і конструкція лазерного пиломіра для практичної реалізації методу. В реальному масштабі часу виміряна функція розподілу частинок за розмірами в газоході установки ВГП-100В ІВЕ НАН України.

4. Розроблені і експериментально перевірені два методи визначення вмісту залишкового вуглецю в частинках леткої золи димових газів вугільних енергоустановок. Перший базується на аналізі інтенсивностей випромінювання, що розсіяні частинками вперед і назад, другий – на аналізі інтенсивностей випромінювання, що розсіяні вперед з двома взаємно перпендикулярними поляризаціями. Лазерний пиломір, який використовує будь-який з цих методів, здатний в потоці визначати не тільки фізичні параметри частинок, але і вміст вуглецю по фракціях леткої золи. За допомогою лабораторного зразка лазерного пиломіра виміряні концентрації залишкового вуглецю у легкій золі Трипільської і Запорізької ТЕС різних фракцій.

5. Аналітично вирішена задача кнудсеновської дифузії газу в капілярі з урахуванням адсорбції на поверхні при змінних температурі стінки та вхідному потоці газу в капіляр. На основі отриманого рішення розроблено пристрій і експериментально реалізований метод адсорбційної модуляції потоку димових газів, що дозволяє:

- 1) визначати енергію адсорбції газових компонент на поверхні капіляра;
- 2) значно (до 100 разів) збільшити чутливість і селективність мас-спектрометричного способу визначення концентрацій шкідливих домішок (SO_2 , NO_x) в димових газах.

Створено експериментальний зразок криогенного адсорбційного модулятора газового потоку.

6. Розроблено спосіб визначення кінетичних параметрів високотемпературного хімічно активного середовища методом флуктуаційної спектроскопії спонтанних флу-

ктуацій температури його компонентів. При використанні даного способу визначена енергія активації брутто-реакції газифікації антрацитового штибу і температура газу-реагенту.

7. Розроблений і експериментально перевірений метод вимірювання яскравісної температури частинок з аналізу флуктуацій інтенсивності випромінювання високотемпературного потоку, який просвічується еталонним джерелом. Його використання дозволило виміряти температуру частинок антрацитового штибу, що горять в проточному реакторі.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лазерный пылемер для определения параметров частиц в двухфазном потоке / В. А. Квицинский, С. И. Кривошеев, В. Н. Макаrchук, И. Н. Хилько // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2000. – № 4. – С. 56–59.
2. Измерение в реальном времени концентраций микрокомпонент дымовых газов масс-спектрометрическим методом / В. А. Квицинский, С. И. Кривошеев, В. Н. Макаrchук, И. Н. Хилько // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2000. – № 4. – С. 59–62.
3. Квицинський В. О. Адсорбційний модулятор газового потоку для мас-спектрометрії / В. О. Квицинський, С. І. Кривошеев, В. М. Макаrchук // Вісник Київського нац. університету ім. Т.Шевченка. Радіофізика і електроніка. – 2004. – № 6. – С. 30–33.
4. Автоматизированный масс-спектрометрический комплекс с криогенным адсорбционным модулятором газового потока / А. И. Быстрый, В. А. Квицинский, С. И. Кривошеев, В. Н. Макаrchук, И. Н. Хилько // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2009. – № 3. – С. 68–74.
5. Kvitsinsky V. A. Adsorption gas flow modulator for sensitivity increase of mass-spectrometric measurements / V. A. Kvitsinsky, S. I. Krivosheev, V. N. Makarchuk // Applied spectroscopy. – 1998. – V. 52, № 7. – P. 919–927.
6. О возможности восстановления констант неупругих процессов в плазме методом корреляционной спектроскопии / В.Г. Дресвянников, С.И. Кривошеев, В.Н. Макаrchук, О.И. Фисун // Журнал технической физики. – 1985. – Т. 55, № 8. – С. 1546–1552.
7. А.с. 1492894 СССР, МКИ⁴ G 01 J 5/50. Способ определения температуры газа и частиц высокотемпературной реагирующей среды и устройство для его осуществления / И.А. Вольчин, В.Г. Дресвянников, С.И. Кривошеев, В.Н. Макаrchук, О.И. Фисун (СССР). – № 4322870/31–25; заявл. 30.10.87; опубл. 07.07.89, Бюл. № 25.
8. А.с. 1543248 СССР, МКИ⁵ G 01 J 5/50. Способ определения температуры движущихся частиц дисперсной среды / И.А. Вольчин, С.И. Кривошеев, В.Н. Макаrchук (СССР). – № 4430045/31–25; заявл. 25.05.88; опубл. 15.02.90, Бюл. № 6.
9. А.с. 1617312 СССР, МКИ⁵ G 01 J 5/52. Устройство для определения температуры взвешенных частиц в газовом потоке / И.А. Вольчин, С.И. Кривошеев, В.Н. Макаrchук, С.В. Марущак (СССР). – № 4618835/31–25; заявл. 13.12.88; опубл. 30.12.90, Бюл. № 48.
10. Лазерний діагностичний комплекс для визначення параметрів частинок у пило-газовому потоці / В. О. Квицинський, С. І. Кривошеев, В. М. Макаrchук, І. М. Хилько // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлу-

атації конструкцій, споруд та машин», збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр. – К.: ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України, 2006. – С. 291-294.

АННОТАЦІЯ

Кривошеев С.И. Определение параметров газовой и твердой фаз в пылегазовых потоках угольных энергоустановок. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика – Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2009 г.

Диссертационная работа посвящена разработке методов определения параметров газовой (концентрация компонентов, температура) и дисперсной (скорость, размер, концентрация, температура частиц, содержание остаточного углерода) фаз в пылегазовых потоках угольных энергоустановок и их практической реализации.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна и практическая ценность работы, приведена информация об использовании полученных результатов, личном вкладе соискателя, апробации результатов и публикациях.

В первом разделе рассмотрены основные существующие оптические методы определения теплофизических параметров частиц и газа применительно к твердотопливной теплоэнергетике. В конце раздела выделены вопросы, требующие решения для разработки методов непрерывного бесконтактного измерения параметров пылегазового потока с использованием современных средств диагностики.

Во втором разделе аналитически решена задача математического описания дифракции излучения на больших частицах (диаметр > 20 мкм), пересекающих лазерный луч. Из геометрической оптики получены выражения для интенсивностей отраженного частицами и преломленного излучений. Использование полученных решений позволило разработать и обосновать оптическую методику определения параметров движущихся частиц из анализа временной зависимости интенсивности рассеянного ими излучения.

В третьем разделе представлены результаты опытной проверки разработанной оптической методики определения параметров частиц. В модельных экспериментах с использованием частиц известного размера получено хорошее согласие экспериментальных данных с теоретическими, что позволило оценить метрологические возможности методики (относительная погрешность измерения размера $< 5\%$, скорости - $< 2\%$). Экспериментально измерена функция распределения частиц по размерам (ФРЧР) в газоходе дымовых газов установки по сжиганию твердого топлива ВГП-100 ИУЭ НАН Украины.

На созданном макете устройства оптической методикой получены ФРЧР летучей золы из газоходов Трипольской и Запорожской ТЭС. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными по рассеву частиц на ситах. Из анализа интенсивностей скрещенного (преломленного) и отраженного излучений для частиц летучей золы определено содержание остаточного углерода (по фракциям), построены калибровочные графики для измерения концентрации углерода в уносе.

В четвертом разделе аналитически решена задача описания диффузии адсорби-

руючого газу через капіляр при произвольних змінах температури його стінки і входного потоку. Знайдено рішення, що дозволило розробити методику роботи адсорбційного модулятора газового потоку. Використання модулятора значно підвищило чутливість мас-спектрометричного способу визначення малих концентрацій шкідливих домішок (окисли азоту і сірки) в димових газах. Роботоздатність методики успішно продемонстрована на створеному експериментальному зразку криогенного адсорбційного модулятора. Використання криогенних температур дозволило розширити склад аналізованих сполук.

В п'ятому розділі теоретично обґрунтовано застосування методу флюктуаційної спектроскопії спонтанних флюктуацій температури газу і частинок для визначення кінетичних параметрів високотемпературної хімічно активної середовища. При експериментальному використанні методу визначено енергію активації бруто-реакції газифікації частинок антрацитового штыба і температура газу-реагенту в проточному реакторі по термічній переробці твердого палива.

Розроблено і експериментально перевірено спосіб визначення яскравісної температури рухомих гарячих частинок з аналізу флюктуацій інтенсивності випромінювання їх потоку, просвічуваного еталонним джерелом. Виміряно температура горіння частинок антрацитового штыба в проточному реакторі.

Ключові слова: летюча зола, розмір частинок, температура частинок, недопал, адсорбційний модулятор.

АНОТАЦІЯ

Кривошеєв С.І. Визначення параметрів газової і твердої фаз у пилогазових потоках вугільних енергоустановок. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06. – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика – Національний університет харчових технологій, Київ, 2009 р.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів визначення параметрів газової (концентрація компонентів, температура) і дисперсної (швидкість, розмір, концентрація, температура, вміст залишкового вуглецю для частинок) фаз у пилогазових потоках. Знайдено аналітичну залежність характеристик розсіяного частинками лазерного випромінювання від їх параметрів. Створено пристрій та розроблено методику його роботи для оптичного вимірювання параметрів частинок летючої золи у потоці. Вирішено задачу опису дифузії газу, що адсорбується, крізь капіляр при довільній зміні температури його стінки. Створено криогенний адсорбційний модулятор газового потоку для підвищення чутливості мас-спектрометричних вимірювань концентрації шкідливих компонентів димових газів. Обґрунтовано використання методу флюктуаційної спектроскопії для визначення енергії бруто-реакції газифікації частинок вугілля та температури газу-реагенту. Розроблено метод вимірювання яскравісної температури частинок, що горять, з аналізу флюктуацій інтенсивності випромінювання пилогазового потоку, який просвічується еталонним джерелом.

Ключові слова: летюча зола, розмір частинок, температура частинок, недопал, адсорбційний модулятор.

ABSTRACT

Krivosheev S.I. The determination of gas and solid phase's parameters of the dusted gas streams in the coal energy installation. – Manuscript.

Thesis for candidate's degree; specialization 05.14.06 – Technical thermo-physics and industrial heat power. – National university of food technologies, Kyiv, 2009.

Dissertation work is devoted to development of the methods of determining parameters of the gas (concentration of components, temperature) and disperse (speed, size, concentration, temperature, residual carbon in the particles) phases of the dusted gas streams. Analytical dependence is found that describes scattering of the laser radiation from the particles, depending on their parameters. The device is constructed and method of its operation is developed, to measure parameters of the fly ash particles in a stream. The problem of describing diffusion of gas being adsorbed when passing capillary is solved for arbitrary change of the capillary wall temperature. Cryogenic adsorption modulator of a gas stream is created to enhance sensitiveness of the mass-spectrometric measurements of harmful components concentration in flue gases. Method of using fluctuation spectroscopy is justified, to determine energy of the reaction of gasification of coal particles and the temperature of gas-reagent. The method of measuring brightness temperature of burning particles is developed from the analysis of fluctuations of radiation intensity scattered by the dusted stream exposed to the rays from the standard source.

Keywords: fly ash, size of particles, temperature of particles, underfiring, adsorption modulator.