

### 3. Характеристика дистанційного лідарного контролю

Лідарний спосіб дистанційного контролю і моніторингу дозволяє істотно зменшити час для ведення РК за рахунок дистанційного виявлення просторової конфігурації зон радіаційного забруднення території із заданими рівнями радіації [3]. Поставлена мета досягається зондуванням імпульсним лазерним випромінюванням приземного шару атмосфери з наступною реєстрацією змін інтенсивностей стоксової і антистоксової компонент в спектрі комбінаційного розсіяння цього випромінювання в атмосфері над радіаційно забрудненою територією або об'єктом.

Відомо, що стоксова компонента утворюється за рахунок того, що розсіювальне середовище віднімає частину енергії у поля світлового випромінювання у тому випадку, коли молекули речовини знаходяться в незбудженому стані. Антистоксова компонента утворюється, навпаки, за рахунок передачі енергії від розсіюючого середовища до поля випромінювання, коли молекули речовини знаходяться у збудженому стані. В результаті, взаємодія іонізуючого випромінювання з повітряним середовищем включає ряд актів перетворення енергії іонізуючого випромінювання, одним з яких є збудження атомів і молекул повітряного середовища. Збудження молекул повітря під впливом іонізуючого випромінювання відбувається в наслідок таких процесів: прямого збудження гамма-випромінюванням, первинними зарядженими частками і вторинними електронами; рекомбінацією та перезарядкою іонів; дезактивацією метастабільних станів молекул. В результаті, число збуджених молекул в одиниці об'єму повітря на радіаційно забрудненій території буде залежати від величини поглиненої дози данного об'єму.

Отже, вказані процеси непружної взаємодії іонізуючого випромінювання з повітряним середовищем призводять до утворення спектрів комбінаційного розсіяння лазерного випромінювання зі зміщенням поля випромінювання в короткохвильову (антистоксовому) область. Фіксуючи відмінність у співвідношенні стоксової і антистоксової компоненти в спектрі комбінаційного розсіяння лазерного випромінювання атмосферою в умовах природного радіаційного фону і в умовах дії джерел іонізуючих випромінювань над радіаційно забрудненою територією, встановлюється факт радіоактивного забруднення. Вимірюючи величину співвідношення стоксової і антистоксової компоненти в спектрі комбінаційного розсіяння можна встановити рівні радіації. Даний спосіб дозволяє контролювати динаміку змін радіаційного фону, вимірювати просторово-геометричні розміри радіоактивно забруднених ділянок місцевості, що істотно підвищує оперативність збору інформації про поля іонізуючих випромінювань, та істотно підвищує радіаційну безпеку ведення контролю і моніторингу, оскільки не вимагає перебування персоналу на радіаційно забрудненій території або об'єкті.

#### Висновок

Представлена загальна характеристика сучасного стану радіаційного забруднення території України та Вінницької області. Зроблений аналіз основних засобів радіаційного і дозиметричного контролю. Роглянуті окремі технічні характеристик пристроїв радіаційного та дозиметричного контролю та виявлені ряд недоліків використання.

Продемонстровано можливості використання лідарних засобів дистанційного контролю радіаційного забруднення території для виявлення джерел іонізуючого випромінювання. При цьому лідарний спосіб дистанційного контролю і моніторингу дозволяє істотно зменшити час для ведення РК за рахунок дистанційного виявлення просторової конфігурації зон радіаційного забруднення території із заданими рівнями радіації.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Владимиров В.А., Михеев О.С., Хмель С.И. и др. Методика выявления и оценки рациональной обстановки при разрушениях (авариях) атомных электростанций. - М., 1989.
2. Депутат О. П., Коваленко І. В., Мужик І. С. Цивільна оборона/ За редакцією В.С. Франка. Підручник. 2-ге вид., доп. - Львів: Афіша, 2001.
3. Патент №2377597 от 27.12.2009.

УДК 681.785.5:504.3

**Васильківський І.В., Петрук В.Г., Кватернюк С.М., Ліщенко М.С. (Україна, Вінниця)**

#### **МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АЕРОЗОЛЬНИХ СТРУКТУР**

Незважаючи на надзвичайно велике різноманіття аерозольних структур і їхню постійну просторово-часову мінливість, можна говорити про певні закономірності в аерозольних структурах і створювати моделі, що досить адекватно характеризують їхні оптичні параметри. Результати сучасних досліджень оптичних параметрів атмосферних аерозолів свідчать про відповідність оптичних властивостей реальних аерозолів до їхніх модельних характеристик.

Як відомо, основними структурними параметрами аерозолів, що визначають їхні оптичні властивості, є: концентрація часток у певних діапазонах їхніх розмірів; комплексний показник заломлення речовини часток певного розміру; стратифікація (однорідність) хімічного складу речовини часток; форма й орієнтація часток в атмосфері; просторовий розподіл атмосферних аерозолів; відстань між частками і загальна кількість часток на шляху зондуемого пучка випромінювання.

Ці параметри відповідають певним фізико-хімічним характеристикам атмосферних аерозолів, а саме: просторово-часовій структурі концентрації і дисперсності часток; хімічному складу і фазовому стану аерозолів; морфологічній структурі аерозольних часток, що визначаються процесом їх трансформації і часом існування в атмосфері.

Дослідження процесів утворення, росту, розподілу і виходу з атмосфери аерозольних часток дозволяє будувати фізичну картину їх еволюції в атмосфері, прогнозувати їхню структуру і оптичні параметри. Уточнення прогнозування структури аерозолію можливе із використанням експресних методів зондування аерозолію при врахуванні метеорологічних параметрів атмосфери.

### 1. Дослідження структури і спектральних характеристик аерозолів

Числові експерименти по розрахунках оптичних характеристик полідисперсних аерозольних систем з урахуванням несферичності часток (сфероїдів і циліндрів) показали, що в більшості випадків у реальній атмосфері врахування несферичності часток дає незначні поправки, як для коефіцієнтів ослаблення, розсіювання і поглинання, так і для індикатрис розсіювання. Тому використання наближення сферичності часток майже завжди виправдано [1].

Однак, у високих шарах атмосфери можуть реалізуватися умови, при яких несферичні частки є чітко орієнтованими, тоді нехтування їхньою несферичністю є неможливим. Окремі дані оптичних досліджень у стратосфері, на висотах вище 15 км, свідчать про існування значної кількості несферичних часток. У нижніх шарах атмосфери, де постійно відбувається накопичення і утворення дрібних крижаних часток при негативних температурах і мікрокристалів техногенного походження (міські і промислові аерозолі) необхідно враховувати несферичність часток аерозолів.

Моделювання оптичних властивостей несферичних часток є досить складним завданням й реально може здійснюватися для наступних наближень: сфероїдів різної витягнутості і сплюснутості, нескінченно довгих циліндрів, сфер із точковими контактами тощо. Однак, використання результатів цих розрахунків ускладнюється через великі об'єми необхідних даних для розрахунку (врахування орієнтації сфероїдноподібних часток відносно джерела і приймача випромінювання), так і практично повної відсутності достовірних даних про функції розподілу сфероїдів за розмірами і їхньої витягнутості для атмосферних умов. Використання моделей сфероїдальних часток дозволяє пояснити експериментально спостережуваний ефект підвищеної величини зворотного розсіювання у високих шарах атмосфери.

Велика кількість параметрів, які визначають оптичні властивості атмосферних аерозолів ускладнює завдання чисельного моделювання їх оптичних характеристик. Однак, використання мікрофізичних даних разом зі спектральними оптичними вимірюваннями дозволяють зробити висновки про особливості спектрального ходу аерозольних коефіцієнтів ослаблення, розсіювання, поглинання і зворотного розсіювання [1]:

1) у видимій і ближній ІЧ-області спектральні залежності коефіцієнтів визначаються виглядом функції розподілу часток за розмірами;

2) можливі аномальні спектральні залежності аерозольного коефіцієнта поглинання, обумовлені присутністю в атмосферних аерозольних частках окислів заліза;

3) аномальні спектральні залежності коефіцієнта аерозольного ослаблення можуть бути обумовлені особливим видом функції розподілу часток за розмірами;

4) присутність в аерозольних частках води призводить до чітко виражених в спектрах аерозольного ослаблення і поглинання смуг в області довжин хвиль 2,7–3,0 мкм і 5,8–6,2 мкм;

5) присутність в аерозольних частках сульфатів і сірчаної кислоти обумовлює наявність смуг поглинання біля  $\lambda = 3,3$  мкм і  $\lambda \cong 9,6$  мкм;

6) присутність силікатних часток проявляється в смузі поглинання 9,0–9,6 мкм;

7) присутність органічних речовин в оптичних характеристиках атмосферних аерозолів слабо проявляється в специфічних смугах поглинання  $\lambda \cong 6$  мкм. Більш суттєвим є прояв особливостей функції розподілу часток з органічних речовин і їхніх смуг поглинання у видимій області спектра  $\lambda > 0,35$  мкм;

8) для поглинаючих властивостей атмосферних аерозолів у видимій і ближній областях спектра дуже важливим є присутність сажі як у вигляді окремих часток, так і у вигляді включень у складі інших аерозольних часток.

Для більш повного прогнозування процесу утворення і еволюції аеродисперсних систем у різних умовах необхідно отримати результати комплексних оптико-мікрофізичних досліджень. Причому важливими є одночасні вимірювання оптичних характеристик аерозолів у видимій, і в інфрачервоній областях спектра. На основі отриманих результатів можна будувати прогностичні моделі аерозолів при використанні вхідних параметрів: метеорологічної дальності видимості і величини відносної вологості повітря. Перший параметр дозволяє здійснити прив'язку розрахункової концентрації аерозолів до аерозольного ослаблення у видимій області спектра: а другий визначати модальні радіуси фракцій і вид функцій розподілу часток за розмірами.

### 2. Моделювання індикатрис розсіювання полідисперсних аерозольних структур

Математичне моделювання індикатрис розсіювання частинок полідисперсних середовищ проводилось із використанням спеціальної програми. При цьому порівнюються результати обчислені за наближенням Релея-Ганса-Дебая (РГД) та на основі теорії Мі. Для моделювання тривимірної поверхні частинки та застосування

сферичних координат більш зручно використовувати модель на основі овалу Кассіні. Тривимірне моделювання поверхні частинки проведено у програмі Maple 10, і наведено на рис.1.

Більшість частинок полідисперсних середовищ неоднорідні і володіють складною формою. Їх вміст можна описати як основне середовище з численними включеннями (гранулами) та ядром. Площа перетину ядра на мікроскопічних зображеннях складає близько 20% від частинки. Гранули переважно мають форму куль діаметром 200 нм або паличок 130×1000 нм.

Для моделювання неоднорідних частинок неоднорідних середовищ використовуються модель зернистої кулі показано на рис.2.

Для монохроматичного пучка випромінювання з довільною поляризацією нестационарне рівняння перенесення в неоднорідному середовищі можна записати у векторній формі

$$\frac{1}{v} \frac{dS(r, \Omega, t)}{dt} + \Omega \nabla S(r, \Omega, t) = -\alpha(r, \Omega) S(r, \Omega, t) + \oint_{4\pi} d\Omega' D(r, \Omega, \Omega') S(r, \Omega', t), \quad (1)$$

де  $S(r, \Omega, t)$  – вектор Стокса світлового пучка в точці  $r(x, y, z)$  у напрямку  $\Omega(n_x, n_y, n_z)$  у момент часу  $t$ ;  $v$  – швидкість світла в середовищі.

Отримання точного розв'язку (1) за краєвих умов, властивих завданням лазерного зондування, одна із складних теоретичних проблем. Тому у багатьох випадках обмежуються розглядом рівняння перенесення в ізотропному середовищі для неполяризованого випромінювання, що характеризується тільки одним відмінним від нуля компонентом вектор-параметра Стокса – інтенсивністю  $I = S_i$ . Для розв'язання такого спрощеного рівняння перенесення розроблений ряд наближених методів. Широкого поширення набув метод малокутового наближення рівняння перенесення за допомогою якого вдалося описати закономірності розповсюдження вузьких колімованих пучків випромінювання в розсіюючих середовищах, що представляють інтерес для лазерної локації атмосфери.

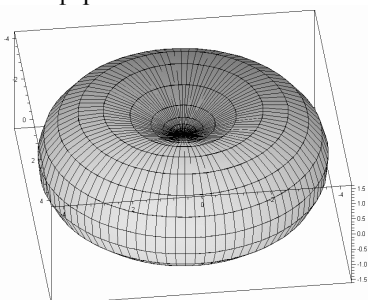


Рис. 1. Тривимірне моделювання поверхні частинки за допомогою овалу Кассіні у полярній системі координат

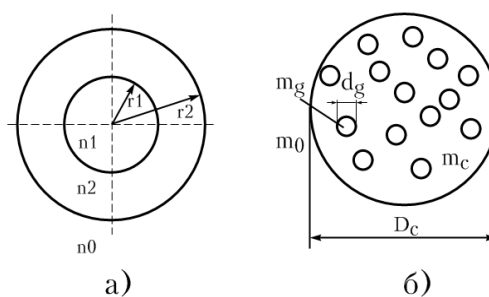


Рис. 2. Моделі аерозольних частинок складної структури

Особливо слід виділити метод Монте-Карло, який базується на статистичному моделюванні процесу перенесення випромінювання, що представляється у вигляді потоку фотонів. Шукана інтенсивність випромінювання в заданих точці простору і напрямку оцінюється за числом «квантів», що потрапляють у відповідний об'єм в певному тілесному куті. Послідовність актів розсіяння розглядається як марківський процес, характеристики якого визначаються оптичними параметрами розсіювального середовища. Метод дозволяє врахувати геометрію зондуючого пучка, спрямованість приймальної антени, розрахувати поляризаційні характеристики розсіяного випромінювання, розділити сумарний сигнал за кратностями розсіяння і досліджувати енергетичні і просторові характеристики багаторазово розсіяного випромінювання. Слід зазначити, що чисельний метод Монте-Карло не дозволяє в аналітичному вигляді отримати шуканий розв'язок, який поєднує параметри зондуючого і відбитого атмосферою сигналу з параметрами прийомно-передаючої системи лідара і оптичними характеристиками атмосфери по трасі зондування. Отримання такого співвідношення можливе тільки наближеними методами.

### 3. Світлорозсіювання сферичними частинками на основі теорії Мі

Теорія Мі, що описує послаблення, поглинання і розсіяння світла однорідними кулями може бути використана для моделювання сфероїдних часток без врахування їх внутрішніх неоднорідностей. Результати моделювання можуть порівнюватись з результатами вимірювань для латексних суспензій з відомими розмірами частинок.

Для сфероїдної частинки об'ємом 94 мкм<sup>3</sup> діаметр еквів'ємної кулі складатиме 5,64 мкм, що відповідає дифракційному параметру  $\rho = 50$  при довжині хвилі  $\lambda = 470$  нм. Обчисливши амплітуди парціальних хвиль  $c_l, b_l$  з використанням функцій Рікатті-Бесселя та Рікатті-Ханкеля першого роду визначимо  $\varphi$ -складову інтенсивності розсіяного випромінювання. Результати наведено на рис.3.

### 4. Моделювання індикатриси розсіювання в рамках РГД для частинок складної структури

Для дослідження індикатриси розсіювання для частинок, що місять ядро та гранули, використовуємо наближення Релея-Ганса-Дебая (РГД), припускаючи  $|m - 1| < 1$ .

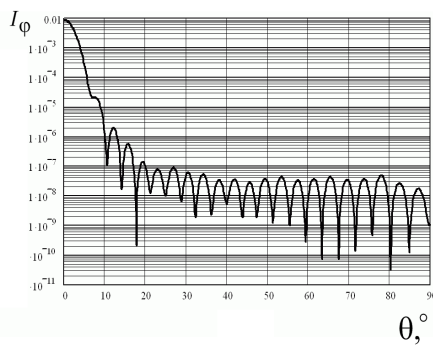


Рис. 3. – Логарифмічна індикатриса для  $\varphi$ -складової розсіяного випромінювання

де  $\mathbf{q} = k(\mathbf{e}_z - \mathbf{n})$ ,  $\mathbf{e}_z$  – одиничний вектор по осі  $z$ . Формфактор кулі, розташованої в центрі координат, обчислюється аналітично:

$$h_s(\rho, \theta) = g_s(u) = \frac{3}{u^3}(\sin u - u \cos u), \quad u = qr = 2\rho \sin \frac{\theta}{2}, \quad (4)$$

де  $r$  і  $\rho$  це радіус і дифракційний параметр кулі, а залежність від азимутного кута відсутня.

Використовуючи лінійність формули (2) по множнику  $m-1$ , розглянемо окремо однорідне середовище у вигляді кулі з множником  $m_c - 1$  і гранули з множником  $m_g - m_c$ . Тоді формула (2) переписується у вигляді

$$S_1(\mathbf{n}) = -\frac{ik^3}{2\pi} \left[ (m_c - 1)V_c h_s(\rho_c, \theta) + (m_g - m_c)V_g h_s(\rho_g, \theta) \xi(N) \right], \quad (5)$$

де  $\xi(N)$  містить залежність від положення гранул  $\xi(N) = \sum_{i=1}^N \exp(i\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{q})$ .

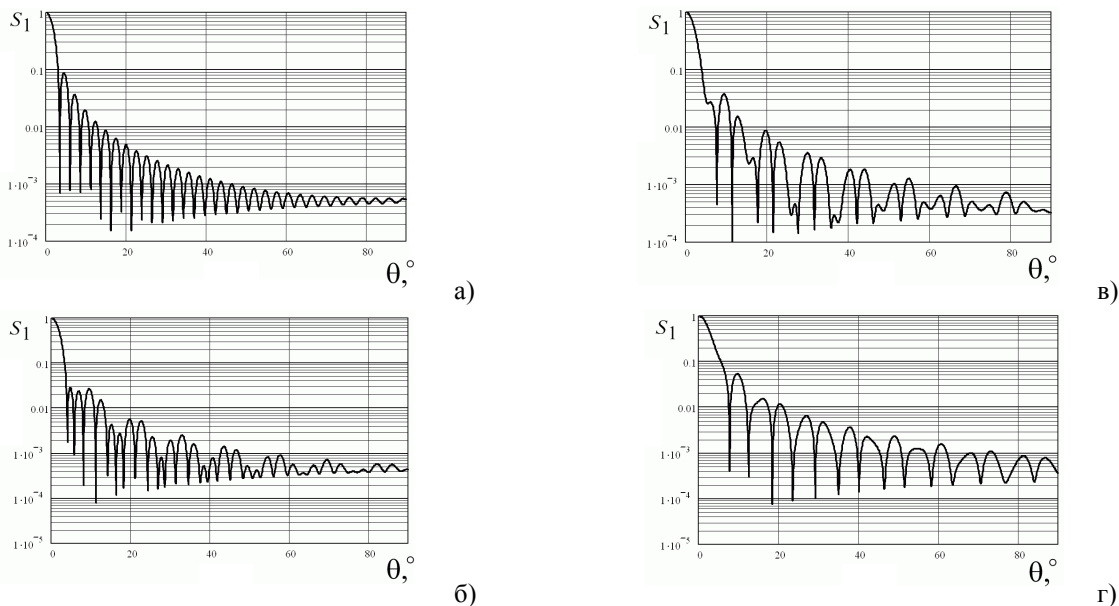


Рис. 4. Логарифмічні індикатриса інтенсивності розсіяного випромінювання для моделі зернистої кулі з ядром за наближенням РГД при а)  $m_{core} = 1,015$ , б)  $m_{core} = 1,05$ , в)  $m_{core} = 1,1$ , г)  $m_{core} = 1,2$

Моделювання індикатрис із застосуванням наближення РГД для зернистої кулі з  $m_c = 1,015$ ;  $m_g = 1,2$ ;  $\lambda = 0,47$  мкм;  $D_c = 8$  мкм; гранул з  $D_g = 0,1$ ,  $N = 2000$ , ядра з  $D_{core} = 3,5$  мкм,  $m_{core} = 1,2$  проведено у Mathcad 13.0, результати моделювання наведено на рис.4. Значна частина інформації про форму і розміри частинок зосереджена у бічних пелюстках індикатрис. Аналізувати індикатриса для  $\varphi$ - і  $\theta$ -складової інтенсивності розсіяного випромінювання зручніше у логарифмічному масштабі. Теорія Мі дозволяє лише оцінити загальні закономірності індикатриса інтенсивності розсіяного випромінювання частками неоднорідних середовищ і неприйнятна для аналізу частинок більш складної форми та внутрішньої структури. Результати моделювання індикатрис розсіявання за наближенням РГД є менш точними у порівнянні зі строгими моделями за теорією Мі чи методом дискретних диполів, однак дозволяють оцінити їх загальні закономірності.

Збільшення розміру гранул, а, відповідно, і збільшення їх об'ємної частки призводить до згладжування бічних пелюсток індикатриса. При збільшенні відносного показника заломлення ядра його вплив на загальну

індикатрису зростає. Оскільки дифракційний параметр ядра менший ніж клітини відповідним чином змінюється форма індикатриси. Оскільки в РГД недиагональні елементи амплітудної матриці розсіювання дорівнюють нулю – поляризація випромінювання не враховується, що є у даному випадку суттєвим недоліком.

Подальші дослідження індикатрис розсіювання частинок полідисперсних середовищ планується здійснювати за допомогою методу Монте-Карло та гібридної апроксимації, що дозволить врахувати особливості світлорозсіювання, що визначаються як тривимірною формою їх поверхні, так і складною внутрішньою будовою.

#### Висновок

Морфологічні характеристики різноманітних частинок полідисперсних середовищ відрізняються досить широкою варіабельністю розмірів та форм. З погляду оптики ці частинки є тривимірним розподілом речовини зі змінною оптичною щільністю. Для випадку частинок зі складною внутрішньою структурою окремо визначається вплив на світлорозсіювання всіх видів неоднорідних включень. Крім того, при проходженні поляризованого випромінювання через оптично активну речовину здійснюється обертання вектора поляризації на кут пропорційний концентрації цієї речовини. Аналіз поширення і розсіювання випромінювання у полідисперсному середовищі зводиться до розгляду характеристик розсіювання і поглинання окремих частинок з подальшим врахуванням концентраційних ефектів і полідисперсності.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Моделирование оптических свойств атмосферных аэрозолей / Ивлев Л.С. // Сборник материалов II международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли». – Санкт-Петербург, 1999. – С.103-110.

УДК 621.7.08: 531.733

**Ночвай В.М. (Україна, Житомир) Петрук В.Г. (Україна, Вінниця)**

#### **ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТА ТЕХНОЛОГІЯ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА**

##### **Актуальність та постановка проблеми**

Розвиток науки, техніки і промисловості, впровадження нових технологічних процесів приводить до все більшого забруднення довкілля, яке прийняло тотальний характер. Це вже привело до того, що екологічна рівновага у ряді районів нашої планети знаходиться під загрозою.

Сучасна енергетика використовує в основному викопне паливо (різні види вугілля, нафта і природний газ) [1]. В даний час понад 85 % всієї енергії виробляється за рахунок викопного палива [2], а за даними роботи [3] - близько 95 %. Зростаючий ріст видобутку палив несе із собою багаточисельні і часто не вирішені проблеми забруднення довкілля. При спалюванні викопних палив утворюється безліч різних забруднень [1].

У складі газопилевих викидів теплоелектростанцій в атмосферу пилових і газоподібних відходів, що утворюються при спалюванні палива, знаходяться оксиди сірки і азоту, зола, сажа, незгорілі дрібні частки палива, диоксин, чадний газ, вуглекислий газ, інші речовини. У складі газопилевих викидів теплоелектростанцій завжди присутні радіонукліди (уран-235, радій-210, 226,228, торій-235, калій-40 і ін.) [4].

Значні по масштабу втрати природі наносять оксиди сірки й азоту, що викидаються теплоелектростанціями і численними котельнями. При контакті з водяною парою атмосфери і аерозолями ці оксиди утворюють відповідно сірчану й азотні кислоти, що у виді часток діаметром 0,1... 1,0 мкм знаходяться в повітрі і хмарах [4].

З урахуванням усіх витрат і втрат при видобутку, транспортуванні, збереженні, спалюванні енергоносія до споживача у виді електроенергії доходить всього 10 %, або з 1000 МДж енергії, яка знаходиться у вугільному шарі, споживач отримує тільки 100 МДж. При використанні нафти або газу цей показник істотно вищий [4].

"Тиск" сучасного виробництва на середовище проявляється в найрізноманітніших формах, однак всі аспекти негативного впливу на природу можна звести до двох головних: виснаження природних ресурсів і погіршення екологічних умов життя людей [1].

Крім того, по міжнародним оцінкам загальні запаси природного палива складають приблизно 12800 млрд тон умовного палива [4], які є обмеженою величиною. А так як нагромадження викопного палива в земній корі відбувалося 300-600 млн. років тому, причому вік більшості шарів кам'яного вугілля оцінюється в 300-350 млн. років, а передбачуваний вік родовищ природного газу складає 500-600 млн. років [1], то для формування нових родовищ палива в земній корі необхідний відповідний період часу.

Отже, пошук відновлювальних видів палива та розроблення екологічно чистої технології його спалювання, яка не приводить до забруднення довкілля є актуальною проблемою.

##### **Аналіз останніх досліджень та постановка завдання**

Сучасні газоочишувальні установки, які впроваджують у всьому світі, дозволяють уловлювати до 95 % золи, на наших вітчизняних теплових станціях - до 70 % [4].

В роботі [9] розроблено та досліджено метод контролю витрат кисню за потоком випромінювання полум'я газового пальника, який забезпечує повне згорання горючого газу та окислювача без залишку.