

СУЧАСНА ТОМОГРАФІЯ ТА ЇЇ МОЖЛИВОСТІ СТОСОВНО ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ВОГНЕГАСНОГО ПОРОШКУ

Національний університет цивільного захисту України

Показано, як комп'ютерне оснащення і успіхи обчислювальної математики сприяють розвитку методів томографічного дослідження внутрішньої структури вогнегасного порошку.

Постановка проблеми. Швидкий прогрес медичної томографії супроводжувався зародженням і розвитком багатьох інших впроваджень цього універсального методу діагностики [1,2,3,4]. Методи обчислювальної томографії стали глибше проникати в техніку фізичного експерименту, у геофізику, фізику космосу, астрономію, аналітичну хімію, вони внесли кардинальні зміни в дефектоскопію, до яких відноситься і діагностика стану речовини у порожнині порошкового вогнегасника. Для визначеності вважають, що промені зондування переміщуються паралельно; тоді одній проекції відповідає деякий кут стосовно обраної системи відліку. Обертаючи промінь у тій же площині на малий кут, повторюємо процес реєстрації промінь - сум і одержуємо нову проекцію. Процес сканування з різними кутами продовжується доти, поки повний кут повороту не складе 180° . У результаті в пам'яті ЕОМ має накопичуватися необхідна вихідна інформація для реконструкції зображення у виділеній площині (перетині).

Аналіз відомих досліджень. Сучасна обчислювальна томографія [3, 4] використовує підхід, який доцільно пояснити на схемі рентгенівської діагностики (рис. 1). При цьому випромінювання рентгенівського джерела повинно бути добре колімоване: діаметр пучка випромінювання повинен мати порядок міліметра. Це дає підстави вважати, що просвічування має вигляд *променів просвічування*.

На рис. 1 «а» колімований пучок променів проходить у площині F, послабляється об'єктом O і реєструється детектором D, при цьому вплив площин F' і F'' цілком усунуто. На рис. 1 «б» зображено вид на площину F зверху: джерело і детектор переміщуються, утворюючи набір променів - сум і формуючи проекцію. Кожен промінь, що пройшов крізь дослідне тіло, характеризується інтенсивністю, ослабленою відносно початкового рівня. Детектор, що розташований на виході, фіксує деяку інтегральну величину цього ослаблення, яка одержала назву *промінь – суми*. Далі сигнал за допомогою аналого-цифрового перетворювача може бути введений у пам'ять ЕОМ у вигляді цифрового імпульсу. Переміщуючи промінь обраній площині (наприклад, паралельно або „віялом”),

одержуємо набір промінь - сум, що визначають одномірну проекцію.

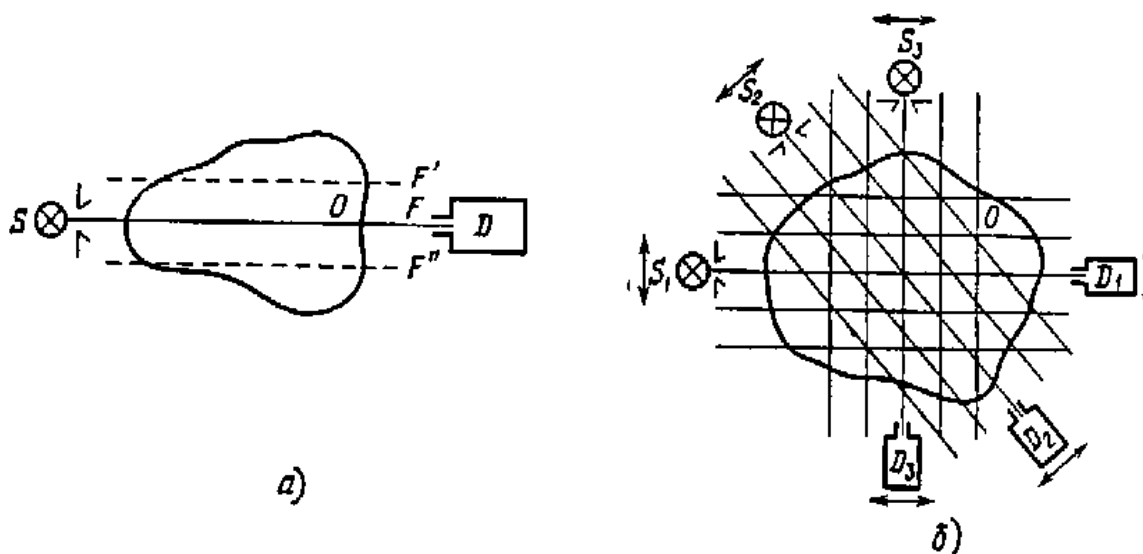


Рис. 1. Схема обчислювальної томографії.

Постановка задачі. Навести теоретичну частину методики діагностики стану порошку у закритих ємностях порошкового вогнегасника за допомогою медичної рентгенівської апаратури, принцип дії якої базується на ідеї томографії.

Основна частина. Процедура відновлення структури об'єкта за обмірюваними проекціями є частиною будь-якого томографічного експерименту. З математичної точки зору, це є задачею інтегральної геометрії [5].

Нехай $g(x)$ і $R(x, y)$ - гладкі функції, визначені відповідно в n -мірному і $(n + k)$ - мірному просторах, $x = (x_1, \dots, x_n)$ і $y = (y_1, \dots, y_k)$ - вектори, $\{M(y)\}$ — деяка сім'я гладких многовидів [3]. Відомі інтеграли

$$\int_{M(x)} R(x, y)g(x)d\sigma = f(y) \quad (1)$$

і вагові функції R , $d\sigma$ — елемент міри на $M(x)$. Потрібно знайти функцію $g(x)$. Відразу ж зазначимо, що в більшості задач обчислювальної томографії $n = 2$ або 3 , $k = 1$ або 2 , $R = 1$, многовид M — точки на прямолінійній або криволінійній траєкторії.

При класифікації задач обчислювальної томографії доцільно виділити лінійні задачі із сильними апріорними обмеженнями. У даному випадку апріорна інформація щодо шуканої функції $g(x)$ звичайно буває наступною. У простому випадку може бути заданий функціональний вид $g(x)$, і тоді залишається визначити лише кілька невідомих параметрів, що входять до задачі.

Далі, може вважатися відомою форма кривих, на яких шуканий двовимірний розподіл $g(x)$ приймає постійне значення (ізолінії). Найпростіший випадок — це ізолінії у виді концентричних кіл, коли об'єкт

неоднорідний лише в радіальному напрямку і для відновлення $g(x)$ (x - радіальна змінна) потрібна одна проекція $f(y)$. Рівняння (1) при $R = 1$ вироджується в цьому випадку в класичне рівняння Абеля

$$\int_0^y \frac{g(x)}{\sqrt{y-x}} dx = f(y), \quad (2)$$

що має для неперервної диференційованої функції $f(y)$ єдиний розв'язок

$$g(x) = \frac{1}{\pi} \frac{d}{dx} \int_0^x \frac{f(y)}{\sqrt{x-y}} dy. \quad (3)$$

Але наявність порівняно простої формули перетворення (1.5) зовсім не означає, що похибка відновлення $g(x)$ буде того ж порядку, що і похибка виміру проекції $f(y)$. Справді, задача відноситься до класу некоректних і будь-який алгоритм чисельного відновлення $g(x)$ необхідно регуляризувати, тобто необхідно використати додаткові обмеження на функцію $g(x)$, погоджених з випадковою помилкою вимірів $f(y)$.

Звернемося знову до рівняння (1.3), покладемо в ньому $R = 1$, а в якості $\{M(y)\}$ розглянемо сім'ю будь-яких гіперплощин у n -мірному просторі. У такій постановці задача визначення, наприклад, коефіцієнта лінійного ослаблення $g(x)$ була розв'язана математиком І.Радонем.

Рис. 2 пояснює результати інверсії Радона в двовимірному випадку [3]. Нехай L — промінь, що перетинає об'єкт, s — відстань, яка виміряна уздовж нього, O — початок системи координат, φ — кут між базисною лінією OM , що лежить в обраній площині, і перпендикуляром, опущеним із O на L , p — найкоротша відстань від O до L , \mathbf{n} — орт, обумовлена тим же кутом φ .

Для обраних позначень можна записати

$$\int_L g(\mathbf{r}) ds = f(p, \mathbf{n}), \quad (4)$$

де двовимірний вектор \mathbf{r} , повернений відносно OM на кут θ , характеризує положення на площині тієї точки, у якій відшукується розподіл g по проекціях $f(p, \mathbf{n})$. Як показано Радонем [6, 7],

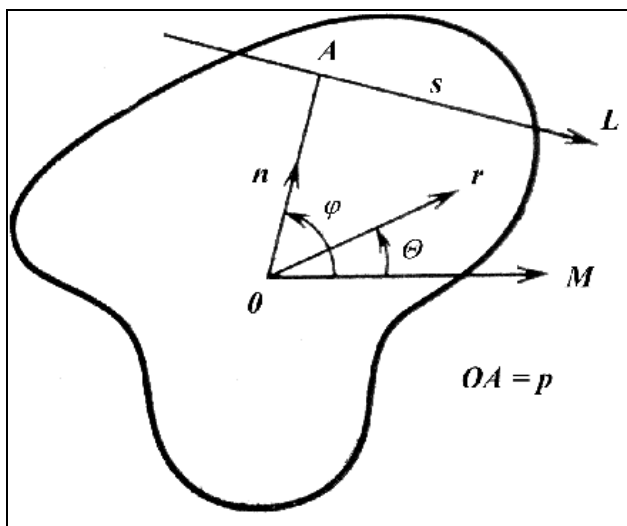


Рис. 2. До визначення змісту змінних, використовуваних у формулах (2) і (3)

$$g(\mathbf{r}) = \frac{\nabla^2}{2\pi^2} \int_0^\pi d\varphi \int_{-\infty}^{+\infty} f(p, \mathbf{n}) \ln|p - \mathbf{r}\mathbf{n}| dp. \quad (5)$$

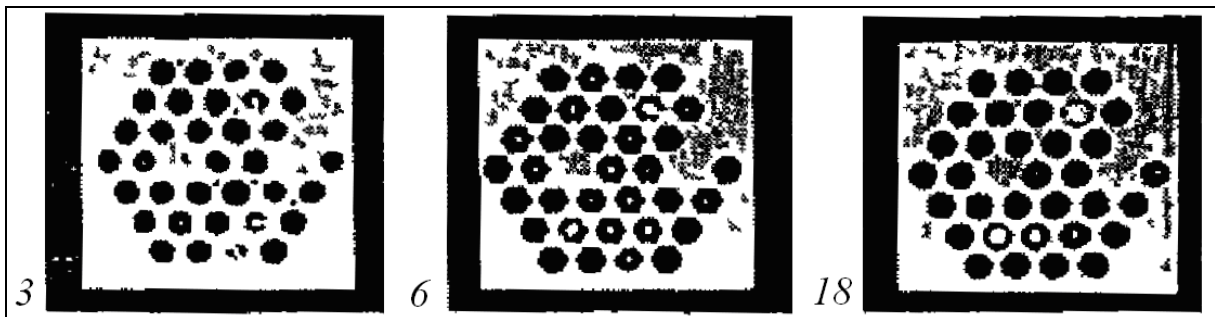
В даний час розроблено велику кількість ефективних алгоритмів, що дозволяють на швидкодіючих комп'ютерах одержувати томограми за проєкціями $f(p, \mathbf{n})$ і реалізованих на комп'ютерних томографах. Для розрахунків можна (звичайно, після відповідної регуляризації, тому що задача залишається некоректною) використовувати вираз (5); у внутрішніх інтегралах маються на увазі головні значення за Коші. Розв'язок Радона у випадку $n = 3$ має вигляд

$$g(r) = -\frac{\nabla^2}{8\pi^2} \int_{S_0} f(r\mathbf{n}, \mathbf{n}) d\Omega, \quad (6)$$

де S_0 - поверхня одиничної сфери, $d\Omega$ - елемент тілесного кута, обумовленого ортом \mathbf{n} , а функція $f(r\mathbf{n}, \mathbf{n})$ є поверхневим інтегралом від функції g , узятий у площині, що проходить через точку \mathbf{r} і нормальної до \mathbf{n} .

Далі розглянемо проблеми дефектоскопії. З кожним роком стає все більш значною роль обчислювальної томографії як ефективного і універсального інтроскопійного методу контролю промислових виробів і усіляких матеріалів, а також і харчових продуктів.

У ряді робіт об'єктом дослідження є важко доступні, і разом з тим найбільш уразливі, елементи конструкції ядерного реактора: тепловиділяючі елементи (твели), охолоджувачі, тощо. На рис. 3 відтворені результати томографування гексагональних ґрат з 37 твелів, у якій бракує трьох елементів, а в чотирьох маються порожнечі [3]. Відновлення здійснювалося за 3, 6 і 18 проєкціям.



**Рис. 3. Приклад дефектоскопії гексагональних ґрат твелів.
Три елементи відсутні, а чотири потребують заміни.
Відновлення виконане по 3, 6 і 18 проєкціям.**

Зроблено висновок про те, що навіть шести проєкцій виявилось б досить для розв'язання поставленої дефектоскопічної задачі, а трьох вистачить для ідентифікації відсутнього або непридатного для експлуатації твела, якщо апріорі відомо, що дефект мається тільки в одному місці ґрат. Аналогічний розв'язок задачі можна здійснити із залученням фантома при

просвічуванні пучком нейтронів з енергією 24 кев [3].

Освоєний томографічний контроль вузлів реактивних двигунів і турбін, неметалічних елементів конструкції вертольота, конденсаторів, розрахованих на великі струми і напруги. Цілий ряд результатів отримано у НДІ Інтроскопії (Москва). Так, у шарі діелектричного виробу діаметром 240 мм легко виявляється наявність мідного дроту діаметром 15 мкм; виходить чітка картина поперечного перерізу труби, яка, крім тонкої оболонки, містить три ряди щільно упакованих металевих трубок, а у внутрішній порожнині - спіральну конструкцію з шести шарів металу із діелектричними прошарками [4].

Слід згадати про діагностичні можливості обчислювальної томографії, заснованої на ЯМР - спектроскопії і що дозволяє одержувати 2- і 3-мірні поля у часі ядерної спінової релаксації. Так, можна здійснювати неінвазивний локальний контроль якості олії, сиру, маргарину й інших харчових продуктів безпосередньо у товарній упаковці, що робилося раніше лише для великого об'єму продукту «у середньому» [2].

Розміри резервуарів систем порошкового вогнегасіння можуть бути досить великими. Тому у якості прототипів доцільно навести системи інтроскопії об'єктів великих габаритів [2, 8].

Так, радіаційний інтроскоп "Модель-4000" фірми "Америкен Сайенс Інженірінг" (США) призначено для просвічування автомобілів і легких транспортних засобів на контрольно-пропускних пунктах з метою знайти вогнепальну зброю, контрабандні предмети, а також для контролю твердопаливних двигунів ракет, тощо (рис. 4).

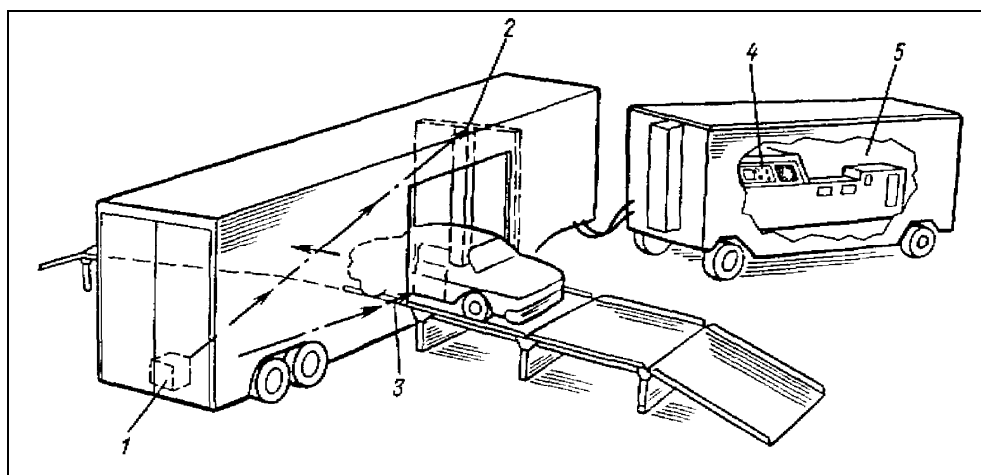


Рис. 4. Структурна схема радіаційного інтроскопа "Модель 4000":
1 – джерело випромінювання; 2- блок детекторів;
3 – транспортер; 4 – цифрова система обробки сигналів;
5 – система аналізу та діагностики

Система радіаційного інтроскопа "Модель 4000" складається з двох боксів устаткування, установлених на транспортних засобах для полегшення транспортування до пунктів контролю. Джерело випромінювання і лінійка детекторів розміщені на причепі з

транспортером, який переміщує досліджуваний об'єкт між ними. Щоб уникнути ефектів вібрації транспортер усередині причепа механічно ізольований від блоку джерело-детектор.

Як джерело випромінювання використовується лінійний прискорювач (з енергією біля 10 Мэв) або радіоактивний ізотоп. Лінійка детекторів виготовлена по запатентованою фірмою технології. Якщо пасажери залишаються в машині при скануванні, то вони одержують дозу менш ніж 1 мР (для порівняння, на сеансі флюорографії пацієнт одержує дозу 30 мР). При цьому час сканування предмета з габаритами 1,85м × 7м × 2,8м складає 10 сек. з просторовим вирішенням 5 мм.

Устаткування для контролю, що не руйнує, за методом радіаційної обчислювальної томографії включає радіаційну систему сканування й обчислювальний комплекс із системою математичного забезпечення і пристроєм візуалізації (рис. 4). До складу системи сканування входять джерело випромінювання, блок детекторів, елементи рентгенооптики (коліматори, компенсатори, фільтри), привід системи сканування з елементами зрівноважування і компенсації вібрацій, вимірювальні і керуючі датчики координат [8].

Детекторні пристрої радіаційної обчислювальної томографії забезпечують перетворення енергії квантів в електричний аналоговий сигнал. Коліматор, детектор і відповідний електронний блок утворюють канал виміру. Для зниження похибки виміру до складу радіаційної обчислювальної томографії включають канал опорного сигналу, розташований звичайно поблизу випромінювача. Вимірювальні канали поєднують у матрицю детекторів. Кількість опорних сигналів досягає 1- 4, вимірювальних - від 1 до 2000.

У цьому томографі фотодетектори пов'язані зі сцинтилятором, який сприймає проникаюче випромінювання, скловолоконними лініями, що виключає вплив іонізуючого випромінювання на фотодетектори. До обчислювального комплексу томографа входить керуюча ЕОМ зі швидкістю прийому даних 10 Мбайт/с, спецпроцесор для попередньої обробки інформації, конвеєрний спецпроцесор, комп'ютер з великою пам'яттю для збереження даних з метою їхнього подальшого використання. Томограф AF/ACTS-1 фірми ARACOR містить рентгенівський випромінювач на 420 кв і може контролювати об'єкти (оболонки) двигунів ракет діаметром до 870 мм і масою до 2,5 т.

Висновок. Використання такої кошовної техніки поки що не доцільне для діагностики побутових порошкових вогнегасників. Тому доцільно провести дослідження, спрямовані на створення методики діагностики порошкового вогнегасника за допомогою дешевшої техніки

Література

1. Машиностроение. Энциклопедия / Измерения, контроль, испытания и диагностика. Т.3-7. Под ред. *В.В.Клюева*. - М.: Машиностроение, 1996.- 464 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / *В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов* и др.; Под ред. *В. В. Клюева*. М.: Машиностроение, 1995. 488с.
3. *Пикалов В.В., Преображенский Н.Г.* Вычислительная томография и физический эксперимент // Успехи физ. наук. - 1983. -141, N.3. - С.469-498.
4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. В 2-х книгах. Под ред. *В.В.Клюева*. - М.: Машиностроение, 1986. - 488 с.
5. *Гельфанд И. М., Граев М. И., Виленкин Н. Я.* Интегральная геометрия и связанные с ней вопросы теории представлений. Серия “Обобщенные функции”. - М.: Физматгиз, 1962. - Вып. 5. - 656 с.
6. *Ауслендер А.Л., Вишняков Г.Н., Левин Г.Г.* Решение интегрального уравнения Радона в оптическом процессоре//Оптика и спектроскопия.— 1980 — Т. 48, вып. 5.— С. 946 - 950.
7. Введение в современную томографию /Под ред. *К.С. Тернового, М.В.Синькова*.- Киев: Наукова думка, 1983.-232 с.
8. Неразрушающий контроль с источниками высоких энергий /*В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин* и др. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.

СОВРЕМЕННАЯ ТОМОГРАФИЯ И ЕЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОГНЕТУШАЩЕГО ПОРОШКА

Н.А. Дригваль, С.В. Корженко, А.Б. Васильев

Показано, как компьютерное оснащение и успехи вычислительной математики оказывают содействие развитию методов томографического исследования внутренней структуры огнетушащего порошка.

MODERN TOMOGRAPHY AND ITS OPPORTUNITIES CONCERNING CONDITION DIAGNOSTICS OGNETUSHASHCHEGO OF POWDER

N.Drigval, S.Korzhenko, A. Vasilyev

It is shown how computer equipment and successes of calculus mathematics render assistance to development of methods tomographic research of internal structure of powder of suppression of fire.