

*М.П. Дивнич, к.т.н., доцент
(Національний авіаційний університет, Україна)*

Лазерний доплерівський прилад одночасного вимірювання швидкості та розміру аерозолів у факелі форсунки

Запропонована структура лазерного доплерівського приладу призначеного для одночасного вимірювання швидкостей та розмірів аерозолів у факелі форсунки. Для підвищення відношення сигнал/завада у приладі встановлюється просторовий фільтр розсіяного лазерного випромінювання.

У багатьох технологічних процесах використовується рідинний аерозоль. Це технологічні процеси у машинобудуванні, приладобудуванні, хімічній промисловості, медицині та сільському господарстві.

Параметри рідинного аерозолу залежать від сфери його використання та знаходяться у межах від 0,5 – 5 мкм при розпиленні лікарського засобу під час лікування легеневих захворювань до 300 – 400 мкм для отримання необхідної вологості у теплицях [1].

Для розпилення рідин застосовуються форсунки, які дозволяють отримати рівномірний їх розподіл на поверхні або в об'ємі.

До основних характеристик форсунок відноситься розмір аерозолів, що розпилюється, та їх розподіл за розмірами у факелі.

Інформація про розподіл розмірів крапель та швидкостей їх руху потрібна для оцінки властивостей всієї крапельно-повітряної системи факела форсунки.

Дані такого типу потрібні для розробки та вдосконалення конструкції технічних пристроїв, які формують крапельно-повітряні системи із заданими параметрами. Така інформація також може дозволити апріорі здійснювати оцінку параметрів роботи двигунів.

Тому важливо отримати експериментальні данні про розмір та розподіл швидкості крапель у факелі форсунки.

Для вирішення такої задачі може бути використаний метод візуалізації двовимірних потоків рідини або газу шляхом цифрової обробки зображень мікрочастинок, що знаходяться у потоці або штучно введені в нього - PIV метод [2].

У PIV методі оцінка швидкості потоку відбувається шляхом вимірювання зміщення групи мікрочастинок трасерів за відомий проміжок часу між двома послідовними кадрами зображення мікрочастинок.

Мікрочастинки освітлюються подвійними потужними короткими імпульсними спалахами лазера. Оптика обладнання формує лазерний промінь, що має форму «ножа». Краплі розсіюють лазерне випромінювання та мають вигляд точок, що світяться. Зображення крапель реєструється камерою, яка вмикається одночасно з лазерним імпульсом.

Перед камерою встановлений смуговий фільтр, який пропускає на CCD матрицю тільки те випромінювання, що дорівнює довжині хвилі, на якій працює лазер.

Таким чином камера реєструє зображенні тільки тих крапель, які знаходяться у площині лазерного променя. Шляхом порівняння двох зображень крапель, які отримані через відомий проміжок часу, визначають шлях, що пройшли краплі. Це дає можливість визначати швидкості, з якою рухаються краплі.

Перевагою такого методу дослідження є те що він дозволяє отримати розподіл швидкостей крапель (поле швидкості) у площині лазерного променя. Крім того можна виміряти дві складові вектора швидкості.

Але недоліком PIV методу є те, що за його допомогою не можна отримати інформацію про розмір крапель та його розподіл у факелі форсунки.

Для визначення розмірів та концентрації аерозолів застосовуються лазерні прилади [3], принцип дії яких заснований на вимірюванні інтенсивності випромінювання, яке розсіяне мікрочастинкою.

Вимірювання швидкості потоків рідини або газу проводять за допомогою лазерних доплерівських вимірювачів швидкості (ЛДВШ) [4], принцип дії яких заснований на визначенні доплерівського зсуву частоти розсіяного випромінювання мікрочастинкою, що рухається у потоці.

Амплітуда доплерівського сигналу ЛДВШ залежить від інтенсивності розсіяного мікрочастинкою лазерного випромінювання. Інтенсивність розсіяного випромінювання збільшується зі збільшенням розміру мікрочастинки.

Проведені розрахунки амплітуди доплерівського сигналу ЛДВШ від діаметру аерозолів води із застосуванням теорії розсіяння Г.А. Мі

Так, на рис. 1 представлена залежність $U_d = F(d)$ амплітуди доплерівського сигналу ЛДВШ від діаметру аерозолів води в діапазоні $d = 0,1 - 20 \mu\text{км}$ при прийманні розсіяного випромінювання вперед.

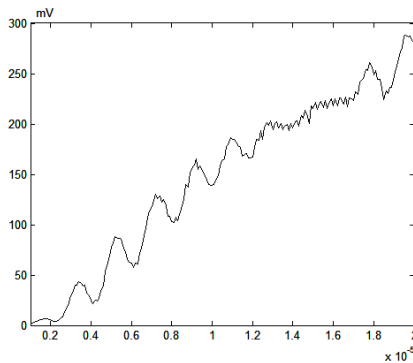


Рис.1 Залежність амплітуди доплерівського сигналу від діаметру аерозолів води $U_d = F(d)$

Ця залежність має складний характер, але амплітуда доплерівського сигналу має тенденцію до збільшення з ростом діаметру мікрочастинки.

В патенті [5] запропоноване технічне рішення, в якому лазерний доплерівський вимірювач швидкості застосовується для визначення розміру мікрочастинок. У такому приладі виключена не однозначність залежності амплітуди доплерівського сигналу від діаметра мікрочастинки (див. рис.1). Але цей прилад може реєструвати та визначати розмір мікрочастинки тільки певного дискретного набору їх діаметрів.

Таким чином ЛДВШ можна використовувати для одночасного вимірювання швидкості та розміру крапель у факелі форсунки.

Пропонується структура лазерного доплерівського приладу, що призначений для одночасного вимірювання швидкості та розміру аерозолів у факелі форсунки (рис. 2).

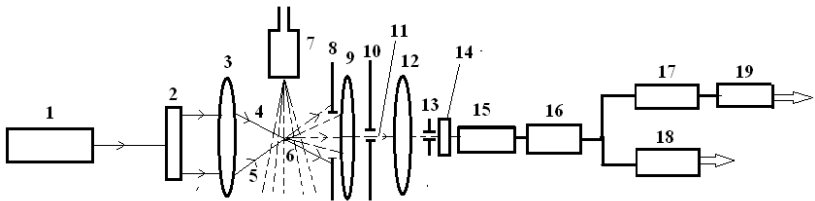


Рис.2. Структурна схема лазерного доплерівського приладу для одночасного вимірювання швидкості та розміру аерозолів у факелі форсунки.

Такий прилад працює наступним чином. Випромінювання лазера 1 поділяється оптичним елементом 2 на два промені, що мають однакову інтенсивність. Далі об'єктивом 3 промені 4 та 5 фокусується у зоні вимірювання 6. Зона вимірювання має форму еліпсоїда обертання та має розміри в залежності від кута між променями 4 та 5 [6]. Тому кут між променями 4 та 5 потрібно вибирати в залежності від діапазону розмірів аерозолів, що розпилюються форсункою 7 (чим більше розмір аерозолів, тим меншим повинен бути кут).

Якщо аерозоль попадає у зону вимірювання 6, то він розсіює лазерне випромінювання. Розсіяне випромінювання має інтенсивність залежно від діаметру аерозолу та зсунуто за частотою в наслідок ефекту Доплера.

Об'єктивом 9 розсіяне випромінювання збирається у полі апертурної діафрагми 8 та фільтрується за допомогою діафрагми 10. Діафрагма 10 (рис.3) має отвір у вигляді вузької щілини, що орієнтована перпендикулярно площині, утвореною променями 4 та 5 та проходить через бісектрису кута між ними.

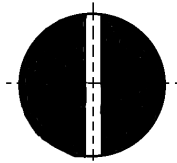


Рис. 3. Форма діафрагми 10.

Така форма діафрагми 10 обумовлена наступними обставинами. Під час розсіяння на мікрочастинці від двох лазерних променів розповсюджуються дві розсіяні хвилі. Амплітуда доплерівського сигналу та відношення сигнал/шум залежать від ступеня узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю, яке дорівнює [7]:

$$k_a = 2\sqrt{I_{s1}I_{s2}/(I_{s1} + I_{s2})}.$$

де I_{s1} - інтенсивність розсіяного випромінювання від лазерного променя 4; I_{s2} - інтенсивність розсіяного випромінювання від лазерного променя 5.

Коефіцієнт узгодження розсіяних хвиль k_a змінюється в межах від 0 до 1 та приймає максимальне значення коли $I_{s1} = I_{s2}$. В свою чергу інтенсивність розсіяного випромінювання визначається інтенсивністю лазерного променя, що опромінює мікрочастинку, її розміром d , комплексним показником заломлення мікрочастинки m , а також залежить від кута θ , під яким розповсюджується розсіяна хвиля.

Кути, під якими розповсюджуються перша та друга хвилі мають однакові значення $\theta_1 = \theta_2$ для напрямків прийому, що лежать на лінії, яка перпендикулярна площині лазерних променів 4 і 5 та проходить крізь бісектрису кута між ними. Таким чином діафрагма 10 виконує функцію просторового фільтра, який забезпечує високу ступінь узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю.

Далі розсіяне випромінювання 11, яке пройшло діафрагму 10, об'єктивом 12 направляється на фотоприймач 15, перед яким встановлені діафрагма 13 та оптичний фільтр 14. Оптичний фільтр 14 пропускає випромінювання, яке має довжину хвилі, на якій працює лазер 1.

Фотоприймач 15 має вбудований підсилювач із широкою смугою пропускання.

Доплерівський сигнал представляє собою імпульс, що має форму імпульсу, який заповнений високочастотною складовою [6].

На фотоприймач 15 попадає також розсіяне випромінювання від аерозолів, які не пройшли через зону вимірювання 6. Сигнали, що формуються на виході фотоприймача у цьому випадку мають форму імпульсів, що не містять високочастотної складової. Для того, що відфільтрувати ці сигнали, після фотоприймача встановлений смуговий фільтр 16, на виході якого формується тільки змінна складова доплерівського сигналу.

Далі цей сигнал одночасно поступає на амплітудний детектор 17 та цифровий пристрій 18.

Цифровий пристрій 18 визначає частоту змінної складової сигналу та перетворює її у цифровий код.

На виході амплітудного детектора 17 утворюється сигнал, який пропорційний амплітуді доплерівського сигналу, а отже і розміру аерозолію.

Сигнал з амплітудного детектора 17 поступає на АЦП для отримання цифрового значення розміру аерозолію.

Далі інформація про цифрові еквіваленти розміру аерозолю та його швидкість поступає на персональний комп'ютер, де може проводитись її подальша обробка.

Для отримання інформації про розподіл швидкостей та розмірів аерозолів у факелі форсунки даний прилад потрібно встановити на пристрій, який переміщує його за трьома координатами.

Список літератури

1. Луговський О.Ф. Способи та пристрої для отримання рідинного аерозолю/ Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2011. - Серія Машинобудування №61, с. 107 - 112.
2. Raffel, M. Particle Image Velocimetry. A Practical Guide / M. Raffel, C. Willert, J. Kompenhans. – Germany: Springer, 1998. – 448 p.
3. TSI Aerotrak 9303-01 Handheld Particle Counter/ [Електронне видання] – Режим доступу: <https://www.mitchellinstrument>.
4. W. Merzkirch, D. Rockwell, C. Tropea Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics/W. Merzkirch - Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2010.- 274 p.
5. Пат. на корисну модель 109900 Україна, МПК (2006/1) G01P 3/36 Лазерний доплерівський лічильник аерозолів/М.П. Дивнич, В.М. Дивнич. № u 2016 03672; заявл. 06.04.2016; опубл., 12.09.2016, Бюл. №17.
6. Albrecht H.-E., Borys M., Damaschke N., Tropea C. Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques/ Albrecht H.-E.- Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. – 740 p.
7. Дивнич В.М. Підвищення глибини модуляції сигналу лазерного доплерівського анемометра узгодженням розсіяних хвиль за інтенсивністю/В.М. Дивнич // Вісник НТТУ «КПІ». Серія Приладобудування. – 2017. – Вип. 54(2). – С.40–44.