

УДК 621.317.7:535.8

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.033842

М. П. ДИВНИЧ¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID: 0009-0000-6260-0069,О. П. КРИВОНОСЕНКО¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID: 0009-0001-0290-4092,О. В. ЄРМОЛАСВА¹, ст. викладач, ORCID: 0009-0007-8623-1123,В. М. АХРАМОВИЧ², доктор техн. наук, професор, ORCID: 0000-0002-6174-5300,¹ Київський авіаційний інститут² Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

ЛАЗЕРНИЙ ДОППЛЕРІВСЬКИЙ ПРИЛАД ОДНОЧАСНОГО ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ТА РОЗМІРУ АЕРОЗОЛІВ У ФАКЕЛІ ФОРСУНКИ

У багатьох технологічних процесах для розпилення рідин застосовуються форсунки, які дозволяють отримати рівномірний їх розподіл на поверхні або в об'ємі. В реактивних двигунах за допомогою форсунок розпилюється паливо. Від якості розпилення якого залежить тяга авіадвигуна. Для визначення основних характеристик форсунки потрібно мати прилад, що вимірює швидкість аерозолів та їх розмір у факелі форсунки. В роботі для вирішення цієї задачі досліджується можливість застосування лазерного доплерівського вимірювача швидкості. Проведений аналіз розсіяного аерозолями випромінювання за інтенсивністю та станом поляризації. Запропоновано підвищення відношення сигнал/завада проводячи шляхом забезпечення узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю та станом поляризації. З цією метою у приладі пропонується встановлювати просторовий фільтр розсіяного лазерного випромінювання. Такий фільтр повинний мати форму діафрагми з двома отворами у вигляді вузької щілини. В межах одного отвору розсіяне випромінювання буде узгодженим за інтенсивністю. В межах іншого отвору випромінювання буде узгодженим за станом поляризації. Застосування такого фільтру у лазерному доплерівському приладі диференціального типу дозволить використовувати його для одночасного вимірювання швидкості та розміру аерозолів у факелі форсунки.

Ключові слова: аерозоль; форсунка; лазер; вимірювання; швидкість; розмір.

Вступ

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

Параметри аерозолю 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. В авіаційних реактивних двигунах за допомогою форсунок розпилюється паливо. Ефективність роботи форсунки впливає на тягу авіадвигуна.

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

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для вимірювання швидкості аерозолів може бути використаний метод візуалізації двовимірних потоків рідини або газу шляхом цифрової обробки зображень аерозолів, що знаходяться у потоці або штучно введені в нього — PIV метод [2].

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

Аерозолі 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 аерозолів 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 зображення тільки тих крапель, які знаходяться у площині лазерного променя. Шляхом порівняння двох зображень аерозолів, які отримані через відомий проміжок часу, визначають шлях, що пройшли аерозолі. Це дає можливість визначати швидкості, з якою вони рухаються.

Перевагою такого методу дослідження є те що він дозволяє отримати розподіл швидкостей аерозолів (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 аерозолів та їх розподіл за розмірами.

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.

Постановка завдання. 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 апіорі здійснювати оцінку параметрів роботи двигунів.

Тому, важливо мати прилад, що дозволяє отримати інформацію одночасно про розмір та розподіл швидкості крапель у факелі форсунки.

Одночасно вимірювати швидкість аерозолів та їх розмір можна за допомогою лазерного доплерівського методу. Розмір аерозолу можна визначати шляхом вимірювання амплітуди доплерівського сигналу ЛДВШ. Але амплітуда доплерівського сигналу такого приладу залежить не тільки від інтенсивності розсіяного аерозолем випромінювання, але і від узгодження розсіяних хвиль за інтенсивністю та станом поляризації [5; 6]. Тому, ЛДВШ буде мати великі похибки при вимірюванні розміру аерозолу.

Таким чином, актуальною задачею є виключення або зниження до мінімуму впливу цих факторів на сигнал приладу.

Основна частина

Розглянемо характеристики розсіяного аерозолем випромінювання в ЛДВШ диференціального типу [7].

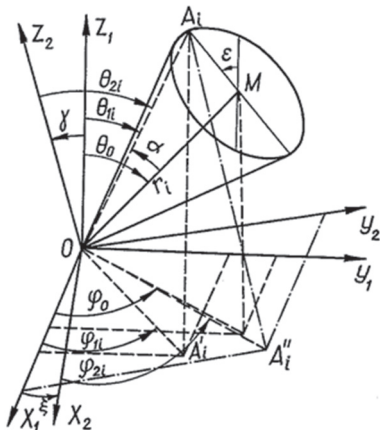


Рис. 1. Системи координат для визначення складових розсіяних хвиль у зоні приймальної діафрагми ЛДВШ диференціального типу

Кути, під якими розсіюється випромінювання від лазерних променів (для напрямку приймання у точці A_i), дорівнюватимуть

$$\theta_{1i} = \arctg\left(\frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{z_1}\right), \quad \phi_{1i} = \arctg\left(\frac{y_1}{x_1}\right), \quad \theta_{2i} = \arctg\left(\frac{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}{z_2}\right), \quad \phi_{2i} = \arctg\left(\frac{y_2}{x_2}\right).$$

Визначимо кути, під якими розповсюджуються два розсіяних променя θ_{1i}, ϕ_{1i} та θ_{2i}, ϕ_{2i} для випадку, коли приймальна діафрагма має не круглу форму, а виконана у вигляді вузької щілини, яка перпендикулярна площині, в якій розташовані лазерні промені ЛДВШ, та перпендикулярна площині лазерних променів.

Якщо зробити перетворення, то координати точки приймання розсіяної хвилі від першого лазерного променя можна визначити з наступної системи рівнянь:

$$\begin{aligned} x_1 &= r_i(\operatorname{tg}\alpha \operatorname{cose} \cos\theta_0 + \sin\theta_0)\cos\phi_0 - r_i \operatorname{tg}\alpha \operatorname{sine} \sin\phi_0, \\ y_1 &= r_i(\operatorname{tg}\alpha \operatorname{cose} \cos\theta_0 + \sin\theta_0)\sin\phi_0 - r_i \operatorname{tg}\alpha \operatorname{sine} \cos\phi_0, \\ z_1 &= r_i(\cos\theta_0 - \operatorname{tg}\alpha \operatorname{cose} \sin\theta_0). \end{aligned}$$

Для діафрагми, що нами розглядається: $\varepsilon = 90^\circ$, $\theta_0 = \gamma/2$, $\varphi_0 = -90^\circ$. Тоді координати точки приймання будуть дорівнювати:

$$x_1 = r_i \operatorname{tg} \alpha, \quad y_1 = -r_i \sin \gamma/2, \quad z_1 = r_i \cos \gamma/2.$$

Кути, під якими розповсюджується перша розсіяна хвиля дорівнюють:

$$\theta_{1i} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_i + \sin^2(\gamma/2)}}{\cos(\gamma/2)} \right), \quad \varphi_{1i} = \operatorname{arctg} \left(-\frac{\sin(\gamma/2)}{\operatorname{tg} \alpha_i} \right) = -\operatorname{arctg} \left(\frac{\sin(\gamma/2)}{\operatorname{tg} \alpha_i} \right).$$

Координати точки прийому у системі координат, що пов'язана з другим лазерним променем ЛДВШ, дорівнюють:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 \cos \xi + y_1 \cos \gamma \sin \xi + z_1 \sin \gamma \sin \xi, \\ y_2 &= -x_1 \sin \xi + y_1 \cos \gamma \cos \xi + z_1 \sin \gamma \cos \xi, \\ z_2 &= -y_1 \sin \gamma + z_1 \cos \gamma. \end{aligned}$$

Будемо вважати, що лазерні промені мають лінійний стан поляризації з коливанням електричних векторів перпендикулярно площині, яка утворена ними $\xi = 0^\circ$. Тоді координати точки приймання будуть дорівнювати:

$$x_2 = x_1 = r_i \operatorname{tg} \alpha_i, \quad y_2 = -y_1 = r_i \sin(\gamma/2), \quad z_2 = z_1 = r_i \cos(\gamma/2).$$

Кути, під якими розповсюджується друга розсіяна хвиля, дорівнюють:

$$\theta_{2i} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_i + \sin^2(\gamma/2)}}{\cos(\gamma/2)} \right), \quad \varphi_{2i} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin(\gamma/2)}{\operatorname{tg} \alpha_i} \right).$$

Таким чином, у випадку прийому розсіяного випромінювання в межах діафрагми, що розглядається — $\theta_{1i} = \theta_{2i}$, а $\varphi_{1i} = -\varphi_{2i}$.

Тоді, електричні вектори розсіяних променів будуть дорівнювати:

$$\begin{aligned} &\text{перша розсіяна хвиля} \\ \dot{E}_{\varphi_{1i}} &= -\frac{E_0 e^{-jk_c r_i}}{k_c r_i} E_1 \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_i + \sin^2(\gamma/2)}}{\cos(\gamma/2)} \right) \right] \sin \varphi_i e^{-j\delta'_{1i}} e^{-j\nu_1 t}, \\ \dot{E}_{\theta_{1i}} &= -\frac{E_0 e^{-k_c r_i}}{k_c r_i} E_2 \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_i + \sin^2(\gamma/2)}}{\cos(\gamma/2)} \right) \right] \cos \varphi_i e^{-j\delta'_{2i}} e^{-j\nu_1 t}, \\ &\text{друга розсіяна хвиля} \\ \dot{E}_{\varphi_{2i}} &= -\frac{E_0 e^{-jk_c r_i}}{k_c r_i} E_1 \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_i + \sin^2(\gamma/2)}}{\cos(\gamma/2)} \right) \right] \sin \varphi_i e^{-j\delta'_{1i}} e^{-j\nu_2 t}, \\ \dot{E}_{\theta_{2i}} &= -\frac{E_0 e^{-k_c r_i}}{k_c r_i} E_2 \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_i + \sin^2(\gamma/2)}}{\cos(\gamma/2)} \right) \right] \cos \varphi_i e^{-j\delta'_{2i}} e^{-j\nu_2 t}, \end{aligned}$$

де E_{10} , E_{20} — модулі напруженості електричного поля лазерних променів; $E_1(\theta_{1i}), E_2(\theta_{1i}), E_1(\theta_{2i}), E_2(\theta_{2i})$ — модулі безрозмірних комплексних амплітуд [8]; $\delta'_{1i}, \delta'_{2i}$ та $\delta''_{1i}, \delta''_{2i}$ — початкові фази складових розсіяних хвиль, які дорівнюють:

$$\delta'_{1i} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} E_1(\theta_{1,i})}{\operatorname{Re} E_1(\theta_{1,i})}, \quad \delta''_{1i} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} E_1(\theta_{2,i})}{\operatorname{Re} E_1(\theta_{2,i})}, \quad \delta'_{2i} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} E_2(\theta_{1,i})}{\operatorname{Re} E_2(\theta_{1,i})}, \quad \delta''_{2i} = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} E_2(\theta_{2,i})}{\operatorname{Re} E_2(\theta_{2,i})}.$$

Так як $\theta_{1i} = \theta_{2i}$, то початкові фази розсіяних хвиль дорівнюють:

$$\delta'_{1i} = \delta''_{1i}, \quad \delta'_{2i} = \delta''_{2i}.$$

Частоти розсіяного випромінювання дорівнюють скалярному добутку вектора швидкості аерозолу \overline{V} на різницю хвильових векторів розсіяної хвилі \overline{k}_s та лазерних променів \overline{k}_1 та \overline{k}_2 :

$$\nu_1 = \frac{1}{2\pi} (\overline{k}_s - \overline{k}_1) \overline{V}, \quad \nu_2 = \frac{1}{2\pi} (\overline{k}_s - \overline{k}_2).$$

Модуль напруженості електричного поля лазерного променя пов'язаний з його потужністю наступним чином:

$$E_{i0} = \sqrt{\frac{P_i}{\pi R_i^2 C}} e^{-\frac{(x_i^2 + y_i^2)}{2R_i}}, \quad C = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}}.$$

де P_i — потужність лазерного променя у зоні вимірювання; R_i — радіус лазерного променя; $i = 1, 2$; x_i, y_i — координати аерозолі відносно центра лазерного променя; ϵ, ϵ_0 та μ, μ_0 — відносна та абсолютна діелектрична і магнітна проникності середовища потоку відповідно.

Таким чином, у випадку застосування діафрагми такої форми, розсіяне випромінювання буде узгоджено за інтенсивністю.

Діафрагма буде виконувати функцію просторового фільтра, що забезпечує високу ступінь узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю.

Ступінь узгодження розсіяних хвиль за станом поляризації оцінюється за допомогою коефіцієнта, що змінюється в межах від 0 до 1, та дорівнює

$$k_{pi} = \rho'_{11}\rho''_{11} + \rho'_{12}\rho''_{21} + \rho'_{21}\rho''_{12} + \rho'_{22}\rho''_{22},$$

де $[\rho'_{ij}]$ та $[\rho''_{ij}]$ — елементи матриці когерентності першої та другої розсіяної хвилі.

З урахуванням зміни кутів розсіяння для випадку, що розглядається, коефіцієнт поляризаційного узгодження буде дорівнювати:

$$k_{pi} = \frac{C}{I_i} (E_{\theta_i}^2 - E_{\phi_i}^2).$$

де $I_i = (E_{\theta_i}^2 + E_{\phi_i}^2)$ — інтенсивність розсіяної хвилі.

При прийомі випромінювання в межах даної діафрагми перша та друга розсіяні хвилі можуть мати еліптичний стан поляризації, якщо $E_{\theta_i} \neq E_{\phi_i}$, тоді $0 < k_{pi} < 1$, лінійний стан при $E_{\theta_i} = 0$ або $E_{\phi_i} = 0$, тоді $k_{pi} = 1$ або кругову поляризацію при $E_{\theta_i} = E_{\phi_i}$, тоді $k_{pi} = 0$. Таким чином, дана діафрагма не забезпечує повне узгодження випромінювання за станом поляризації.

Розглянемо випадок коли приймальна діафрагма буде мати вигляд вузької щілини, але розташована в площині, що утворена лазерними променями. Тоді кути, під якими розповсюджуються розсіяні хвилі дорівнюють:

$$\theta_{1i} = (\gamma/2 - \alpha_i); \quad \theta_{2i} = (\gamma/2 + \alpha_i); \quad \phi_{1i} = \phi_{2i} = 90^\circ.$$

Електричні вектори розсіяних променів будуть дорівнювати:

перша розсіяна хвиля

$$\dot{E}_{\phi_{1i}} = -\frac{E_0 e^{-jk_c r_i}}{k_c r_i} E_1 (\gamma/2 - \alpha_i) e^{-j\delta'_{1i}} e^{-j\nu_{1i} t}, \quad \dot{E}_{\theta_{1i}} = 0.$$

друга розсіяна хвиля

$$\dot{E}_{\phi_{2i}} = -\frac{E_0 e^{-jk_c r_i}}{k_c r_i} E_1 (\gamma/2 + \alpha_i) e^{-j\delta'_{2i}} e^{-j\nu_{2i} t}, \quad \dot{E}_{\theta_{2i}} = 0.$$

Таким чином, перша та друга розсіяні хвилі будуть мати лінійний стан поляризації, електричні вектори яких перпендикулярні площині, яка утворена лазерними променями ЛДВШ. Для такої діафрагми забезпечується узгодження розсіяного випромінювання за станом поляризації.

Але узгодження за інтенсивністю дана діафрагма не забезпечує, тому що розсіяні хвилі розповсюджуються під різними кутами $\theta_{1i} \neq \theta_{2i}$, що приводить до того, що інтенсивності першої та другої розсіяної хвилі різні $I_{1i} \neq I_{2i}$.

Таким чином, для підвищення ступеня узгодженості випромінювання за інтенсивністю та станом поляризації приймальна діафрагма повинна мати два отвори (рис. 2). У вертикальному отворі буде забезпечуватись узгодження хвиль за інтенсивністю, але не за станом поляризації, а у горизонтальному отворі навпаки.

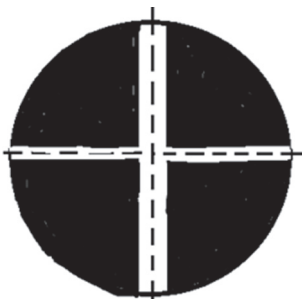


Рис. 2. Форма діафрагми

Якщо вставити дану приймальну діафрагму у ЛДВШ диференціального типу, то його можна використовувати для одночасного вимірювання швидкості та розміру аерозолів у факелі форсунки.

Фотоприймач ЛДВШ повинен містити вбудований підсилювач із широкою смугою пропускання. Доплерівський сигнал на виході фотоприймача представляє собою імпульс, який заповнений високочастотною складовою [7]. На фотоприймач попадає розсіяне випромінювання від аерозолів, які не пройшли через зону вимірювання. Сигнали, що формуються на виході фотоприймача у цьому випадку мають форму імпульсів, що не містять високочастотної складової. Для того, щоб відфільтрувати ці сигнали, після фотоприймача потрібно встановити смуговий фільтр, на виході якого формується тільки змінна складова доплерівського сигналу. Далі цей сигнал потрібно одночасно направити на амплітудний детектор та цифровий при-

стрій, який визначає частоту змінної складової сигналу, що пропорційна швидкості аерозолу та його амплітуду, яка пропорційна розміру аерозолу.

Висновки

Лазерний доплерівський вимірювач швидкості може застосовуватись для одночасного вимірювання швидкості та розміру аерозолів у факелі форсунки. Для цього у ЛДВШ після об'єктиву, що приймає розсіяне випромінювання, потрібно встановити діафрагму, форма якої запропонована в роботі. За допомогою такого просторового фільтра буде підвищена ступінь узгодження розсіяного випромінювання за інтенсивністю та станом поляризації, а отже збільшиться відношення сигнал/завада. У приладі до виходу фотоприймача потрібно підключити смуговий фільтр, амплітудний детектор та цифровий пристрій вимірювання частоти та амплітуди доплерівського сигналу.

Список використаної літератури

1. *Луговський О. Ф.* Способи та пристрої для отримання рідинного аерозолу // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2011. Серія Машинобудування №61. С. 107–112.
2. *Raffel M., Willert C., Kompenhans J.* *Particle Image Velocimetry. A Practical Guide.* Germany: Springer, 1998. 448 p.
3. *TSI Aerotrak 9303-01 Handheld Particle Counter* / [Електронне видання]. URL: <https://www.mitchellinstrument.com>.
4. *Merzkirch W., Rockwell D., Tropea C.* *Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 274 p.
5. *Дивнич В. М.* Підвищення глибини модуляції сигналу лазерного доплерівського анемометра узгодженням розсіяних хвиль за інтенсивністю // Вісник НТТУ «КПІ». Серія Приладобудування. 2017. Вип. 54(2). С. 40–44.
6. *Азарков В. М., Дивнич В. М.* Зменшення впливу поляризації розсіяного випромінювання на сигнал лазерного анемометра // Вісник інженерної академії наук України. 2018. №4. С. 153–157.
7. *Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques* / H.-E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, C. Tropea. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 274 p.
8. *Gouesbet G.* *Generalized Lorenz-Mie theory.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 247 p.

N. Dyvnych, O. Kryvonosenko, O. Yermolaieva, V. Akhramovych

LASER DOPPLER DEVICE FOR SIMULTANEOUS MEASUREMENT OF THE VELOCITY AND SIZE OF AEROSOLS IN THE NOZZLE FLAME

Liquid aerosol is used in technological processes in mechanical engineering, instrument building, chemical industry, medicine and agriculture and other areas. Nozzles are used to spray liquids, which allow to obtain their uniform distribution on the surface or in the volume. In aviation jet engines, fuel is sprayed using nozzles. The thrust of an aircraft engine depends on the quality of fuel atomization. Information on the distribution of droplet sizes and their movement velocity is required to assess the properties of the entire droplet-air system of the nozzle torch. To determine the main characteristics of the nozzle, you need to have a device that measures the velocity of aerosols and the size of aerosols in the nozzle flame.

In order to solve this problem, the possibility of using a laser Doppler velocimeter is investigated.

Analysis of the radiation scattered by aerosols by intensity and state of polarization was carried out. It is proposed to increase the signal/interference ratio of the device by ensuring the matching of scattered radiation by intensity and polarization state.

For this purpose, it is proposed to install a spatial filter of scattered laser radiation in the device. Such a filter should have the form of a diaphragm with two holes in the form of a narrow slit.

Within the limits of one hole, the condition of complete matching of radiation in terms of intensity will be fulfilled, and within the limits of the other hole, the condition of matching according to the state of polarization will be fulfilled.

It is shown that if such a receiving diaphragm is inserted into a differential-type laser velocity meter, it can be used to simultaneously measure the velocity and size of aerosols in the nozzle plume. The laser velocity meter photo detector must contain a built-in amplifier with a wide bandwidth. Doppler signals must then be sent simultaneously to an amplitude detector and a digital device. Using a digital device, the frequency of the variable component of the signal will be measured, which is proportional to the velocity of the aerosol and the amplitude of the signal is measured which is proportional to the size of the aerosol.

Keywords: aerosol; nozzle; laser; measurement; velocity; size.