

УДК 621.373.8

д.т.н., проф. Мочалін Є. В.,  
Браженко В. М.  
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

## РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ PIV

В роботі наведені результати теоретичних досліджень пов'язаних з методикою розрахунку енергетичних параметрів лазерного випромінювання, які потрібні для реалізації методу цифрової трасерної візуалізації. Розглянуто основні фактори, що впливають на ці параметри: характеристики приймача випромінювання, розмір і коефіцієнт відбиття трасуючих частинок, формування лазерної площини. Наведено експериментальні результати реалізації PIV.

**Ключові слова:** цифрова трасерна візуалізація, світловий потік, характеристики ПЗЗ, теорія Мі, лазерний ніж.

### Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами.

Сьогодні все більше застосування знаходять чисельні методи моделювання турбулентності, засновані на перших принципах динаміки рідини і газу. Однак, через велику обчислювальну трудомісткість цих методів їх широке застосування, при вирішенні складних завдань, може початися ближче до кінця нинішнього століття.

Специфіка ситуації полягає в тому, що для опису турбулентних течій, згідно з сучасними уявленнями, достатньо класичних рівнянь Нав'є-Стокса, і в цьому сенсі проблема може вважатися давно вирішеною. Але незважаючи на експоненційне зростання потужності обчислювальної техніки, що спостерігається в останні десятиліття, її можливості все ще недостатні для вирішення цих рівнянь при високих числах Рейнольдса, які мають практичний інтерес [1].

Найбільшого поширення отримав метод тісно пов'язаний з фотографуванням частинок-трасерів, які переносяться потоком в середовищі. Прикладами таких методів є метод цифрової трасерної візуалізації, або ж у іноземних джерелах Particle Image Velocimetry (PIV), який відноситься до класу безконтактних методів вимірювання швидкості в потоках. Серед низки інших інструментів для дослідження структури

течій він займає особливе місце завдяки можливості реєструвати миттєві просторові розподіли швидкості. Дана перевага є особливо важливою при вивченні потоків, що містять великомасштабні вихрові структури [2].

**Мета роботи.** Робота присвячена розрахунку оптимальних енергетичних параметрів лазерного випромінювання, які необхідні для дослідження потоків рідини та газу в обраному перерізі методом цифрової трасерної візуалізації. Розглядається також визначення оптимальних параметрів приймача випромінювання, що використовується у методі, та обґрунтування рекомендацій з підбору параметрів експериментальної установки для отримання мінімальних помилок вимірювань.

**Викладення основного матеріалу.** Спочатку потрібно розглянути загальні характеристики фото-приймача оптичного випромінювання — ПЗЗ-матриці.

Першим критерієм є тип матриці. При порівнянні ПЗЗ з покадровим і рядковим перенесенням сигналу перевага віддається першому типу, оскільки в ПЗЗ з покадровим перенесенням повністю використовується вся поверхня світлочутливої секції. У тих ПЗЗ, де застосовується механізм

рядкового перенесення, частина світлочутливої секції закрита непрозорими плівками (приблизно до 30% площі секції). Відповідно втрачається частина світлового потоку.

Одним з важливих параметрів є розмір ПЗЗ структури. Розмір матриці описується параметром із назвою формат. Формат — це розмір діагоналі матриці, що приблизно дорівнює діаметру мішені відповідного видикона. Він вимірюється у дюймах і приймає значення: 1", 2/3", 1/2", 1/3", 1/4" і т.ін. Найчастіше в реалізації методу PIV використовують матриці з великим значенням формату (цей критерій визначається просторовими розмірами досліджуваної області).

Інший важливий параметр ПЗЗ матриці — квантова ефективність. Під квантовою ефективністю розуміється відношення числа зареєстрованих зарядів до кількості тих, що потрапили на кристал фотонів. У ПЗЗ цей параметр може приймати значення від 4% (низькоякісні ПЗЗ, що використовуються, як правило, в недорогих відеокамерах) до 50% в хороших камерах і навіть вище — аж до 95%.

Важливою характеристикою цифрової відеокамери є бітність процесора дискретизації.

У сучасних моделях цифрових відеокамер використовуються 8-, 10-, 12- або 14-бітові процесори. Чим більше кількість біт, з допомогою яких описується піксель, тим вище точність вибірки. Цифрові процесори сигналів на одному біті можуть описувати піксель тільки однією або двома величинами, а 12-бітний цифровий процесор дозволяє отримувати приголомшуючу кількість значень — 4096.

Далі слід розглянути інтегральну чутливість та порогову чутливість ПЗЗ. Інтегральна чутливість дозволяє розрахувати вихідний сигнал ПЗЗ при заданому світловому потоці (у ватах на квадратний метр). Однак реалізоване при цьому відношення сигнал/шум залишається невідомим. З цієї точки зору істотно більш корисним виявляється поняття порогової чутливості, яке

визначається пороговим світловим потоком  $\Phi$  на заданій довжині хвилі  $\lambda_0$ , що створює на виході ПЗЗ сигнал з заданим відношенням сигнал/шум. Для розрахунку цього відношення необхідно проаналізувати основні складові шумів ПЗЗ.

Всі складові шумів ПЗЗ породжені різними фізичними процесами і, в силу цього, некорельовані та незалежні. З урахуванням цього середньоквадратичне значення шумів на виході ПЗЗ може бути знайдене як

$$\overline{n_{CCD}} = \sqrt{\overline{n_e^2} + \overline{n_z^2} + \overline{n_d^2} + \overline{n_t^2} + \overline{n_{out}^2} + \overline{n_{vt}^2}}, \quad (1)$$

де  $\overline{n_e^2}$  — фотонний шум;  $\overline{n_z^2}$  — заряд непорожнього нуля;  $\overline{n_d^2}$  — дробові шуми;  $\overline{n_t^2}$  — шуми перенесення;  $\overline{n_{out}^2}$  — шум установки потенціалу вузла детектування заряду;  $\overline{n_{vt}^2}$  — шум вихідного гальванометричного транзистора.

Відношення сигнал/шум розраховується

$$\psi = \frac{S(\lambda_0)AT_i\Phi}{n_{CCD}}, \quad (2)$$

звідки гранична чутливість

$$\Phi = \frac{\psi n_{CCD}}{S(\lambda_0)AT_i}. \quad (3)$$

Тоді величина максимального світового потоку на піксель, який і буде максимумом динамічного діапазону приймача світового потоку, визначається наступним чином:

$$F_{\max} = \frac{n \cdot P_{phe}}{A \cdot T_i \cdot \theta}, \quad (4)$$

де  $T_i$  — час накопичення,  $A = \Delta x \cdot \Delta y$  — площа світлочутливого елемента,  $P_{phe}$  — енергія одного кванту випромінювання на даній довжині хвилі,  $\theta$  — квантовий вихід,  $n$  — кількість фотоелектронів генерованих в матриці. Величина

$S(\lambda_0) = \frac{\lambda_0}{hc} \theta(\lambda_0)$  трактується як значення

спектральної чутливості ПЗЗ  $S(\lambda_0)$  на довжині хвилі  $\lambda_0$  [3].

Знаючи світловий потік, який падає на матрицю, можемо розглянути світловий потік розсіяний часткою. Для цього скористаємося теорією Мі [4].

Рівняння, яке є зручним для практичного вжитку, при розсіюванні на одній частинці, має вигляд:

$$I = \frac{I_0(i_1 + i_2)}{2k^2 r^2}, \quad (5)$$

де  $k = 2\pi/\lambda$  — хвильове число,  $r$  — відстань від центра частинки до поверхні матриці фотоприймача,  $I_0$  — падаюче випромінювання,  $I$  — розсіяне випромінювання,  $i_1$  і  $i_2$  позначають інтенсивності світла, площина коливань якого перпендикулярна і паралельна площині спостереження відповідно.

У самому загальному випадку обчислення, що виконуються в задачі Мі, зводяться до визначення величин:

$$i_1 = |S_1(\theta)|^2, \quad i_2 = |S_2(\theta)|^2, \quad (6)$$

де  $S_1(\theta), S_2(\theta)$  — амплітудні функції розсіювання, що визначаються формулами (6), (7).

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta)), \quad (7)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \pi_n(\cos\theta) + a_n \tau_n(\cos\theta)), \quad (8)$$

де  $a_n, b_n$  — комплексні функції, які визначаються значеннями функцій Рікатті — Бесселя, аргументи яких виражаються через параметри частинки  $m$  — коефіцієнт заломлення,  $x = ka = \frac{2\pi a}{\lambda}$  — ефективний радіус,  $a$  — геометричний радіус частинки,  $\lambda$  — довжина хвилі випромінювання і

не залежать від кута розсіювання  $\theta$ . Значення комплексних функцій розраховано у таблицях розсіювання Лоусона, Керра, Гампрехта та ін. Кількість членів, які потрібно взяти, дорівнює  $n_x = 7 + 1.2x$ . Функції кута розсіювання  $\pi_n, \tau_n$ , які залежать тільки від  $\theta$  і виражаються через перші і другі похідні поліномів Лежандра  $n$ -го порядку з аргументом  $\cos\theta$ :

$$\pi_n(\cos\theta) = \frac{1}{\sin\theta} \cdot P_n^l(\cos\theta), \quad (9)$$

$$\tau_n(\cos\theta) = \frac{d}{d\theta} \cdot P_n^l(\cos\theta). \quad (10)$$

Наступним кроком є визначення параметрів лазерної площини (ЛП), яка становить одну із головних елементів. За її допомогою відбувається освітлення частинок. Оптична система формування ЛП полягає, в простому випадку, з однієї циліндричної лінзи (рис. 1) та із системи лінз у більш складних реалізаціях.

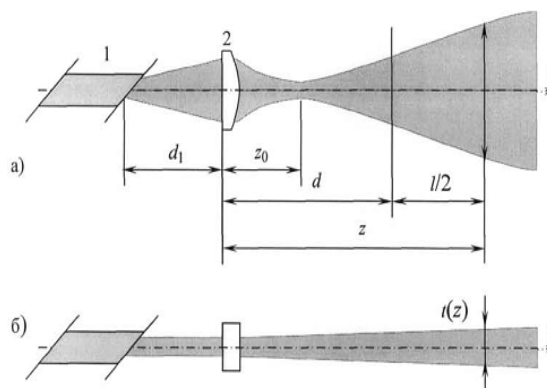


Рисунок 1 — Однолінзова оптична схема у виглядах збоку (а) та зверху (б):  $h$  — висота площини,  $t$  — товщина площини,  $d_1$  — відстань від лазера до лінзи,  $z_0$  — розташування перетяжки перетвореного пучка,  $d$  — відстань від лінзи до площини,  $l$  — довжина зондувальної області.

Вибір оптичної системи визначається окремо для кожної конкретної задачі, виходячи із заданих умов.

Нас цікавить зміна щільності потужності уздовж осі розповсюдження гауссового пучка в заданій оптичній системі (рис 2). Щільність потужності обчислюється за формулою:

$$F_e = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot E \cdot E, \quad (11)$$

де

$$E(x, y, z) = A_0 \cdot \frac{w_0}{w(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{w^2(z)}} e^{j(k \cdot z + 2\frac{k^2(x^2+y^2)}{2R} + \varphi)}; \quad (12)$$

$$w(z) = w_0 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{z}{R_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (13)$$

$$R(z) = z \cdot \left[ 1 + \left( \frac{R_0}{z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (14)$$

$$Q = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\mu \cdot \mu_0}}, \quad (15)$$

де  $A_0$  — амплітуда поля в центрі пучка;  $w$  — радіус пучка, тобто відстань, протягом якої амплітуда зменшується в  $w$  разів;  $w_0$  — радіус пучка в перетяжці;  $R$  — радіус кривизни хвильового фронту;  $\varphi$  — зсув фази по вісі  $z$ .

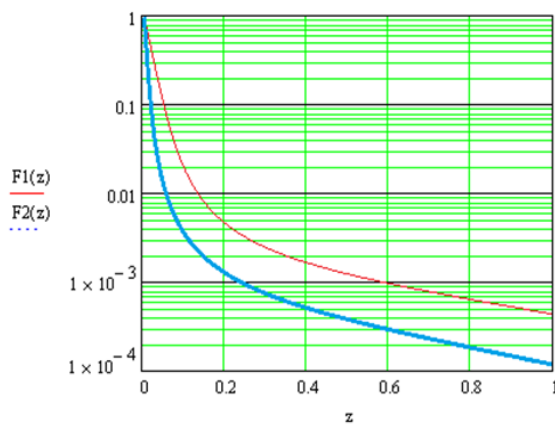
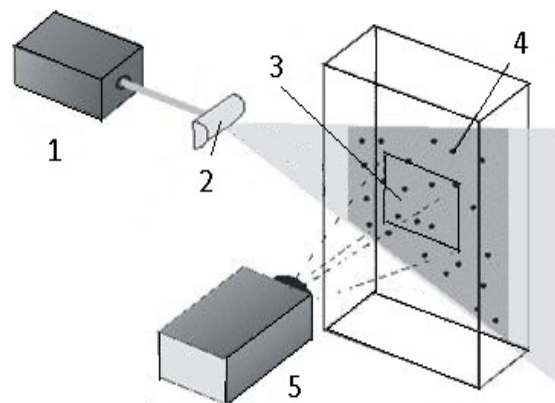


Рисунок 2 — Залежність щільності потужності  $F_e$  уздовж осі  $z$  при різних значеннях  $f$ :  $F1(z)$  — 10 мм,  $F2(z)$  — 5 мм.

**Характеристика експерименту.** Стенд (рис. 3), розроблений спеціально для вирішення даної задачі, включає в себе безперервний гелій-неоновий лазер, який генерує випромінювання з довжиною хвилі 0,6320 мкм і потужністю 30 мВт. Лазерний пучок формується за допомогою оптичної системи (циліндрична лінза) і потрапляє в ємність з водою, де знаходяться частинки сріблянки ( $Al_2O_3$ ) розміром приблизно 0,02-0,04 мм. Полупрофесійний фотоапарат фіксує зображення в області лазерної площини зі швидкістю 10 кадрів в секунду. Значення ISO дорівнює 100, діафрагма  $f/5.6$ .

Отримані зображення та результати їх обробки у вигляді векторного поля швидкостей в досліджуваній області подані на рис. 4, 5. Обробка трасерних кадрів здійснювалась за допомогою програми PIVlab.

**Висновки.** У роботі представлена методика розрахунку енергетичних характеристик лазерного випромінювання, що є необхідними для реалізації цифрової трасерної візуалізації при експериментальному визначенні полів швидкості у потоках рідин та газів.



1 — безперервний гелій-неоновий лазер;  
2 — оптична система; 3 — ємність з водою;  
4 — частинки сріблянки; 5 — полупрофесійний фотоапарат

Рисунок 3 — Схема експериментального стенду

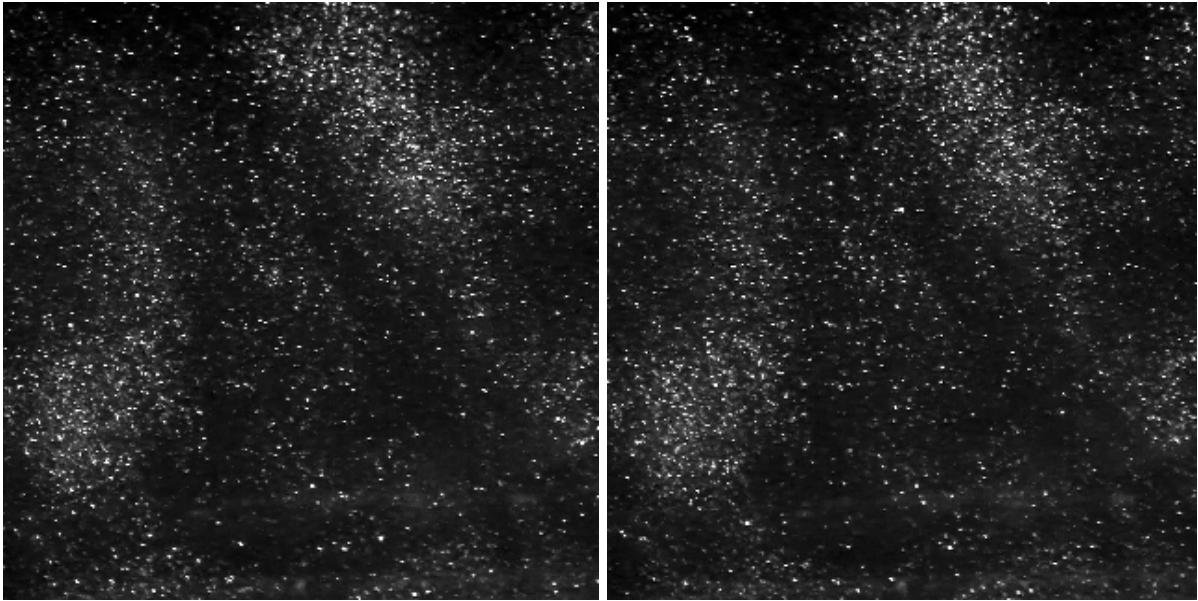


Рисунок 4 — Кадри, отримані з витримкою камери 1/250 с. (інтервал між кадрами 0.2 секунди).

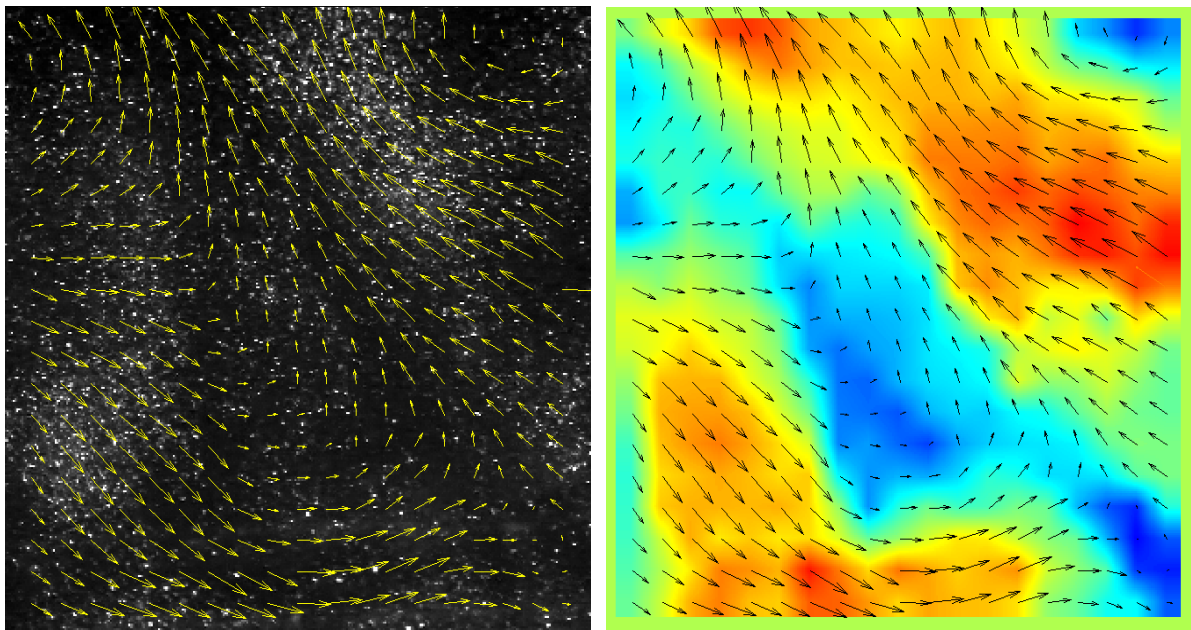


Рисунок 5 — Розподіл швидкостей в досліджуваній області (кольором позначена величина завихреності), розрахований с допомогою PIVlab

Досліджено базові характеристики приймача випромінювання, необхідні для отримання якісних цифрових зображень і їх подальшої програмної обробки за допомогою кросскореляційного алгоритму. Розглянуто розсіювання випромінювання на частці-трасері в потоці рідини (теорія Мі) та вплив цього явища на розрахунок

енергії на виході лазерної апертури. Проведено теоретичний аналіз вимог системи формування лазерної площини, а саме циліндричної короткофокусної лінзи. На основі наведеної методики одержані результати експериментального дослідження, які пов'язані з отриманням миттєвого поля швидкості в рідинному потоці.

**Бібліографічний список**

1. Spalart P. R. "Strategies for turbulence modeling and simulations" / P. R. Spalart // *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2000, v. 21, pp. 252–263.
2. Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J. In: *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. - Springer-Verlag., Berlin Heidelberg New York, 2007. — 253 p.
3. Цифровое преобразование изображений / Под ред. проф. Быкова Р. Е. — М.: Телеком. 2003. — 233 с.
4. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсионными частицами / Д. Дейрменджан // Пер. с англ.; под ред. К. Я. Кондратьева. — М.: Мир, 1971. — 165 с.

**Рекомендовано до друку к.т.н., проф. ДонДТУ Паерандом Ю. Е.,  
д.т.н., проф. СХУ ім. В. Даля Корсуновим К. А.**

Стаття надійшла до редакції 19.06.14.

**д.т.н. Мочалин Е. В., Браженко В. Н.** (ДонДТУ, г. Алчевск, Україна)

**РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА PIV**

*В работе приведены результаты теоретических исследований связанных с методикой расчета энергетических параметров лазерного излучения, необходимых для реализации метода цифровой трассерной визуализации. Рассмотрены основные факторы, влияющие на эти параметры: характеристики приемника излучения, размер и коэффициент отражения трассирующих частиц, формирование лазерной плоскости. Приведены экспериментальные результаты реализации PIV.*

**Ключевые слова:** цифровая трассерная визуализация, световой поток, характеристики ПЗС, теория Ми, лазерный нож.

**Mochalin Y. V. Doctor of Engineering Science, Brazhenko V. N.** (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

**CALCULATION OF ENERGY PARAMETERS OF LASER RADIATION IMPLEMENTING THE PIV METHOD**

*The results of theoretical research, concerned with the method of calculating energy parameters of laser radiation, which are necessary for the implementation of digital tracer visualization method, are presented. Basic factors which affect those parameters are considered, such as characteristics of the radiation receiver, size and coefficient of tracer particles reflection, laser plane formation. Experimental results of PIV method implementing are given.*

**Key words:** Particle Image Velocimetry, optical path, characteristics of the CCD, Mie's theory, laser knife.