

УДК 514. 8

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ГІДРОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЧАСТИНОК В ЛАЗЕРНІЙ ДОПЛЕРІВСЬКІЙ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Морозов М. В. к. т. н.

Мовчан С. І. к. ф - м. н.

Таврійський державний агротехнологічний університет,

(0619) 42-25-85

Анотація – На підставі отриманих експериментальних даних форми доплерівського сигналу пропонується методика моделювання процесу вимірювання, розрахунку і визначення гідромеханічних параметрів частинок водних розчинів з використанням MathCad.

Ключові слова – форма доплерівського сигналу; лазерна інтерферометрія; електрофоретична швидкість, ефективний діаметр, дзета потенціал частинки домішок; математичне моделювання з використанням MathCad

Постановка проблеми. До галузі екологічних досліджень крім прямих засобів і технологічних заходів необхідно віднести непрямі методи, що дозволяють визначати окремі параметри або комплекс гідромеханічних параметрів. Відомі раніше оптичні способи визначення параметрів частинок водних розчинів не в повній мірі відповідали поставленій задачі. Тому, в обсязі виконання досліджень, пов'язаних із методикою розрахунку гідромеханічних параметрів частинок в залежності від форми доплерівського сигналу, запропоновано математичне моделювання процесу вимірювання та аналізу отриманих експериментальних результатів.

При розробці, проектуванні та експлуатації локальних схем очищення виробничих стічних вод важливе місце мають технології контролю якості очищення і вимірювання параметрів частинок домішок. Методи лазерної, доплерівської інтерферометрії забезпечують визначення швидкості, ефективного діаметру, електрокінетичного потенціалу та концентрації частинок домішок водних розчинів дистанційно, в реальному часі з достатньо високою точністю [1 - 3]. Аналіз параметрів і форми доплерівського сигналу з виходу лазерного

інтерферометра дозволяє провести математичне моделювання та автоматизувати процес вимірювання гідромеханічних параметрів частинок домішок.

Аналіз останніх досліджень. При проведенні експрес – контролю якості очищення стічних вод гальванічного виробництва замкнених та локальних схемах очищення важливою характеристикою є концентрація частинок домішок. Для вимірювань цього параметру використовується еталонний розчин з вже відомою концентрацією та порівняння результату цього вимірювання [4, 5].

Визначення конкретних, раніше не вирішених аспектів проблеми, що розглядається. Використання лазерної доплерівської інтерферометрії для проведення експрес – контролю якості очищення стічних вод в замкнених системах очищення потребує автоматизації процесу вимірювання та обробки отриманих експериментальних результатів для подальшого керування параметрами технологічних схем очищення. Для цього необхідно удосконалення методики математичного моделювання процесу вимірювання, оцінки можливих похибок та меж застосування методу вимірювання.

Формулювання цілей статті. Використання оптичних методів лазерної доплерівської інтерферометрії дозволяє визначати гідромеханічні параметри частинок водних розчинів.

Мета роботи полягає в удосконаленні технології визначення і методики розрахунку гідромеханічних параметрів частинок в залежності від форми доплерівського сигналу

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Удосконалити метод математичного моделювання форми доплерівського сигналу та визначити її залежність від гідромеханічних параметрів частинок і схеми, яка використовується для вимірювання.

2. Розробити методику розрахунку гідромеханічних параметрів частинок та автоматизації процесу вимірювання з урахуванням гаусового розподілу інтенсивності лазерного випромінювання по перерізу зондуючого променя в залежності від форми доплерівського сигналу.

3. Визначити можливі похибки вимірювання, оптимальні параметри експериментальної установки та допустимі межі застосування розробленого оптичного метода вимірювання.

Основна частина. Розроблено і в лабораторних умовах апробовано диференційну оптичну схему лазерного доплерівського інтерферометра (рис. 1), яка має переваги перед іншими аналогічними схемами [2, 3].

Запропонований спосіб вимірювання швидкості і ефективного діаметру частинок здійснюється наступним чином. За допомогою

дзеркал 2, 3 і світлоподільника 4 формують два когерентних світлових пучка, які за допомогою лінзи 5 фокусують під кутом α один до одного в зондуєчу зону електрофоретичної камери 6.

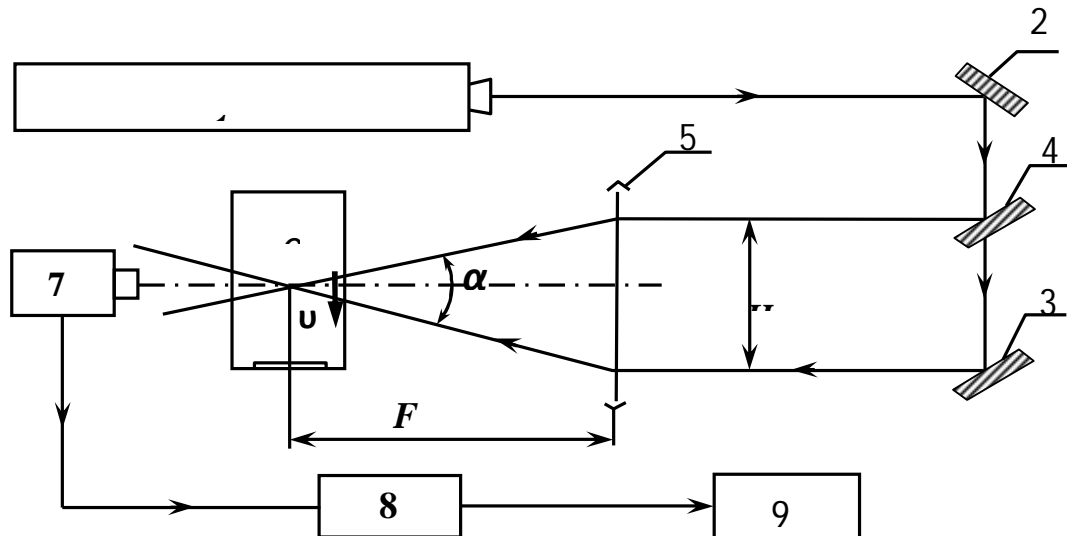


Рис.1. Схема лазерної доплерівської вимірювальної установки для визначення електрофоретичної швидкості, ефективного діаметру и величини електричного потенціалу при електрофорезі: 1 – джерело когерентного випромінювання – лазер типу ЛГН - 222; 2, 3 – дзеркала; 4 – світловий подільник; 5 – лінза; 6 – зондуєча зона електрофоретичної камери; 7 – фотоприймач; 8 - цифровий запам'ятовуючий осцилограф (С 9 – 8); 9 – персональний комп'ютер.

Інтенсивність світла, яке розсіюється частинкою котра рухається зі швидкістю v у напрямку перпендикулярному оптичній вісі лінзи 5, реєструється за допомогою фотоприймача 7, вихід з якого електрично пов'язаний з цифровим запам'ятовуючим осцилографом 8.

Для обґрунтування параметрів лазерної доплерівської установки і алгоритму процесу вимірювання швидкості руху та розмірів частинок була розглянута залежність амплітуди електричного сигналу з фотоприймача інтерферометра від часу. При цьому частота ν доплерівського сигналу визначає швидкість руху частинки завислих речовин. Величина електричного сигналу (сила фотоструму або напруга) пропорційна інтенсивності світлової хвилі у просторі реєстрації, яка утворюється внаслідок інтерференції двох когерентних хвиль, розсіяних частинкою. При русі частинки у зоні перетину двох зондуєчих гаусових лазерних пучків кут розсіювання змінюється несуттєво. Тому інтенсивність розсіяного випромінювання залежить тільки від розташування частинки відносно вертикальної вісі гаусових зондуєчих пучків (рис. 2).

Інтенсивність доплерівського сигналу у першому наближенні має наступну залежність від часу і визначається за формулою:

$$I(t) = U(t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu \cdot t + \varphi), \quad (1)$$

де $\nu = \frac{1}{T} = \frac{2 \cdot \nu \cdot n}{\lambda} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$ – частота доплерівського сигналу; $\lambda = 0,6328$ мкм – довжина хвилі когерентного випромінювання гелій – неоновому лазеру; φ – початкова фаза; n – показник заломлення рідини, T – період доплерівського сигналу.

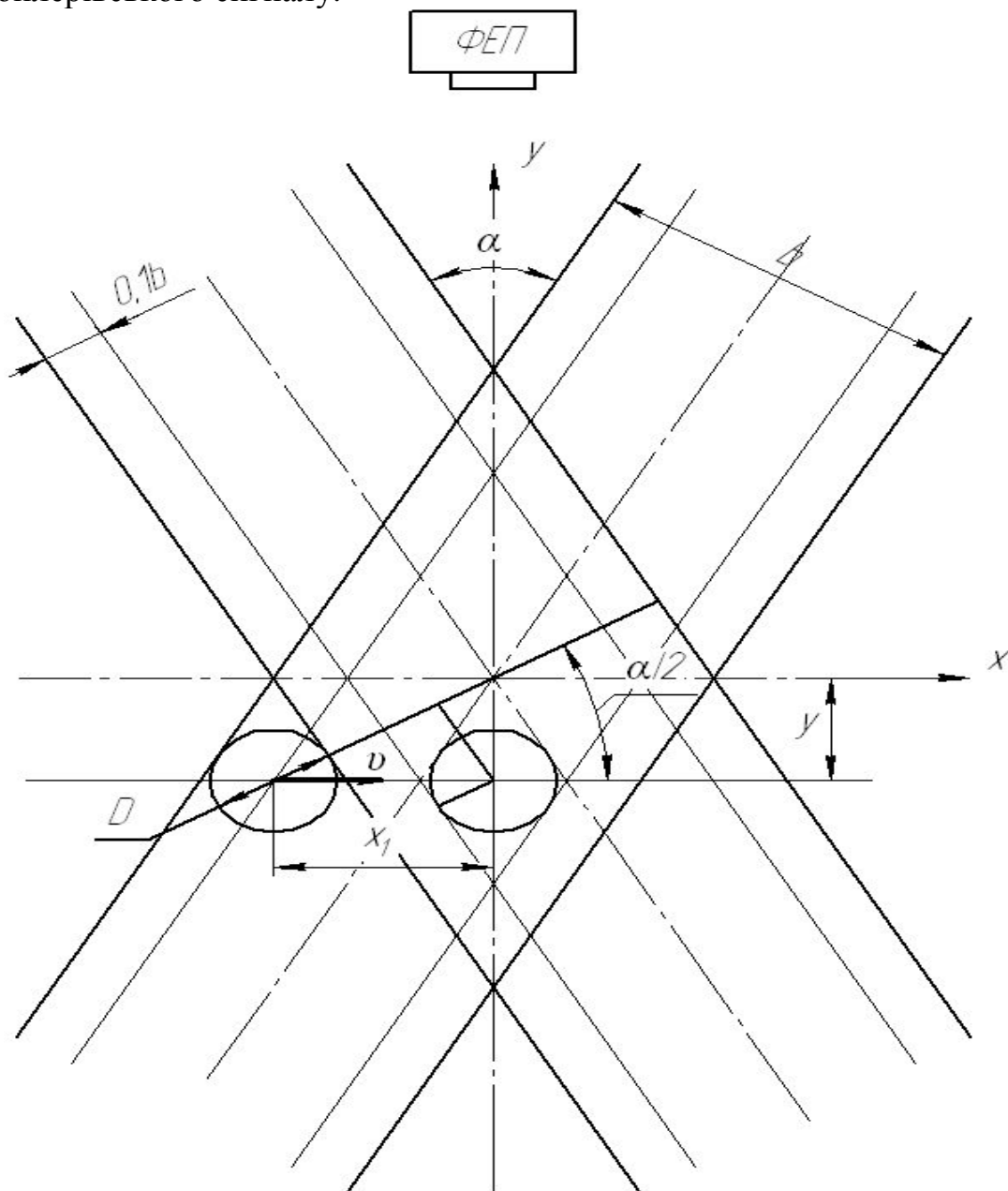


Рис.2. Отримання доплерівського сигналу $I = I(t)$: $\frac{\alpha}{2}$ – кут розсіювання; D – діаметр частинки; b – діаметр лазерних пучків.

Визначивши межі інтенсивності доплерівського сигналу і підставивши їх до рівняння (1) отримуємо систему рівняння, яка визначається за формулою:

$$U(t) = \begin{cases} at & \text{при } 0 \leq t \leq t_1 = \frac{(D + 0,1 \cdot b)}{v \cdot \cos \alpha / 2} \\ 1 & \text{при } t_1 < t \leq t_1 + 2 \cdot t_2 \\ 1 - a(t - t_1 - 2t_2) & \text{при } t_1 + 2t_2 < t < 2(t_1 + t_2) \end{cases}, \quad (2)$$

де $a = \frac{v \cdot \cos \alpha / 2}{D + 0,1 \cdot b} = \frac{1}{t_1}$; $t_1 = \frac{D + 0,1 \cdot b}{v \cdot \cos \alpha / 2}$ - час зростання амплі-

туди доплерівського сигналу; D - діаметр частинки; $y = \frac{b \cdot j}{2 \cdot \sin \alpha / 2}$ -

зміщення положення частинки відносно осі ОХ;

$2 \cdot t_2 = \frac{0,8 \cdot b - D - 2y \cdot \sin \alpha / 2}{v \cdot \cos \alpha / 2}$ - час сталої амплітуди доплерівського сигнала;

b - діаметр гаусового пучка.

Параметр $j = 0 \dots 1$ визначає положення частинки відносно горизонтальної вісі симетрії ОХ (рис. 2).

Час зростання амплітуди доплерівського сигналу t_1 визначається тривалістю руху частинки у граничній зоні, коли поверхня частинки двома пучками освітлена не повністю:

$$t_1 = \frac{x_1}{v} = \frac{D + 0,1 \cdot b}{v \cdot \cos \alpha / 2}. \quad (3)$$

Розроблено алгоритм і програму математичного розрахунку з використанням системи MathCAD форми доплерівського сигналу з виходу фотоприймача інтерферометра. Ця програма дозволяє одержати форму сигналу $I(t)$ для різних параметрів установки: b , α , φ , E (напруженість електричного поля) та параметрів частинок: D , ζ (електрокінетичний дзета - потенціал). Вид сигналу, параметри руху частинки: v , u та доплерівського сигналу: v , T , t_1 , t_2 виводяться на екран монітора та друк (рис. 3).

Час максимального значення амплітуди доплерівського сигналу визначається рухом частинки в зоні перетину двох лазерних пучків і залежить від положення частинки $y = j \cdot y_{max}$ відносно горизонтальної осі симетрії ОХ:

$$t_3 = 2 \cdot t_2 = \frac{0,8 \cdot b - D - 2 \cdot y \cdot \sin \alpha / 2}{v \cdot \cos \alpha / 2} \quad (4)$$

Тоді тривалість доплерівського сигналу визначається за формулою:

$$t_4 = 2 \cdot (t_1 + t_2) \quad (5)$$

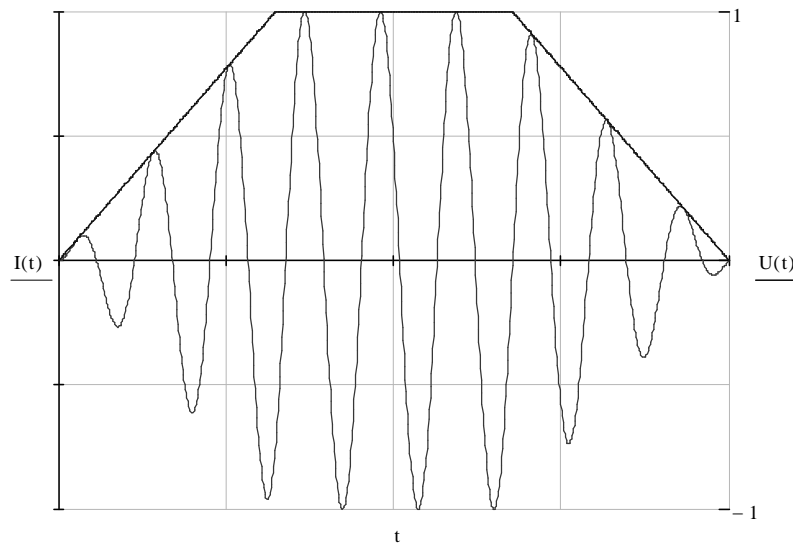


Рис.3. Форма доплерівського сигналу, яка отримана у результаті теоретичного розрахунку за допомогою ПК: $b = 50$ мкм; $\alpha = 6^0$; $\varphi = 0^0$; $E = 1000$ В / м; $D = 8$ мкм; $\zeta = 0,8$ В; $v = 0,38$ мм / с; $y = 170$ мкм; $\nu = 84$ Гц; $T = 12$ мс; $t_1 = 34$ мс; $t_2 = 19$ мс.

Детальний аналіз залежності форми доплерівського сигналу від параметрів вимірювальної установки дозволяє вибрати значення кута α між двома зондуючими пучками і діаметра b гаусових пучків, а також розробити алгоритм вирішення зворотної задачі – за видом доплерівського сигналу визначити швидкість і діаметр частинок дисперсної фази. При відстані між двома лазерними променями (рис. 1) $H = 0,025$ м та фокусної відстані лінзи $F = 0,25$ м кут α між двома зондуючими променями дорівнює

$$\alpha = 2 \cdot \arctg \cdot \frac{H}{2 \cdot F} = 6^0. \quad (6)$$

Діаметр b лазерного променя в зондуючій зоні перетину двох пучків дорівнює значенню, яке визначається за формулою:

$$b = 1,22 \cdot \lambda \cdot \frac{F}{d} = 50 \text{ мкм}. \quad (7)$$

Для визначення електрофоретичної швидкості v руху частинки вимірюємо період $T = 1/\nu$ доплерівського сигналу. Тоді швидкість визначається за формулою:

$$v = \frac{\lambda \cdot \nu}{2 \cdot n \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\lambda}{2 \cdot T \cdot n \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (8)$$

де $\lambda = 0,6328$ мкм – довжина хвилі випромінювання лазера;

$n = 1,33$ - показник заломлення води.

Для визначення діаметра частинки D необхідно виміряти час t_1 зростання інтенсивності доплерівського сигналу. Тоді з врахуванням

гаусового розподілу інтенсивності випромінювання по перерізу зондуючого променя ефективний діаметр визначається за формулою:

$$D = t_1 \cdot v \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - 0,1 \cdot b \quad (9)$$

Величина електрокінетичного дзета – потенціалу ξ визначається за формулою Смолуховського:

$$\xi = \frac{3 \cdot \eta \cdot v}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E} \quad (10)$$

де ε - відносна діелектрична проникність; η - в'язкість рідини; E - напруженість електричного поля, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф / м – електрична стала.

Програма математичного розрахунку гідромеханічних параметрів: електрофоретичної швидкості, діаметра та електрокінетичного дзета - потенціалу частинок дисперсної фази дозволяє проводити оцінку відносної похибки алгоритму, який було використано. Максимально допустима похибка алгоритму вирішення зворотної задачі при визначенні ефективного діаметра частинки дорівнює 6 %, якщо вимірювальна лазерна установка має такі параметри: $b = 50$ мкм, $\alpha = 6^\circ$ та $E = 1000$ В / м.

Визначаємо межі значень швидкості та діаметру частинки, які можливо вимірювати при застосуванні розглянутої оптичної схеми лазерного доплерівського інтерферометру та алгоритму вирішення зворотної задачі. Мінімальне значення швидкості частинки визначається мінімальною частотою ν_{\min} доплерівського сигналу, який визначається за формулою:

$$\nu_{\min} = \frac{\nu_{\min} \cdot \lambda}{2 \cdot n \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (11)$$

При $\nu_{\min} = 1$ Гц отримаємо $\nu_{\min} = 4,5 \cdot 10^{-6}$ м / с. При цьому відносна похибка алгоритму складає $\delta\nu = 5$ %.

Максимально можливе значення швидкості визначається максимальною частотою доплерівського сигналу: $\nu_{\max} = 50$ Гц, $\nu_{\max} = 0,46$ м / с, $\delta\nu = 5,3$ %.

Максимально припустимий діаметр частинки, який можливо виміряти при використанні цієї методики, визначається із умови: $t_2 = 0$. Тоді при $y = 0$: $D_{\max} = 40 \cdot 10^{-6}$ м, $\delta\nu = 3,5$ %. На рисунку 4 представлено форму доплерівського сигналу у цьому випадку.

Мінімальний діаметр частинки визначається із умови: $t_1 = 2 \cdot T$. Тоді при $D_{\min} = 4,0 \cdot 10^{-6}$ м, $\delta\nu = 6,4$ %, при $\alpha = 6^\circ$ та $\hat{a} = 5 \cdot 10^{-5}$ м. На рисунку 5 представлено форму доплерівського сигналу при цих же умовах.

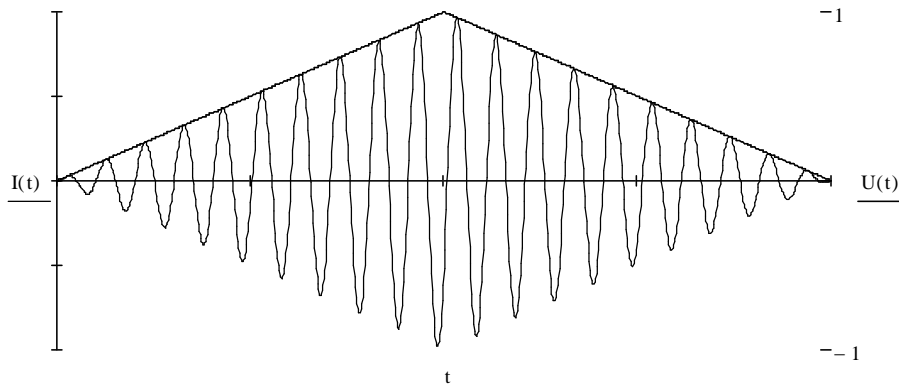


Рис. 4. Форма доплерівського сигналу при: $D_{\max} = 40$ мкм; $\zeta = 0,3$
В; $v = 0,14$ мм / с; $y = 0$; $t_2 = 0$ мс.

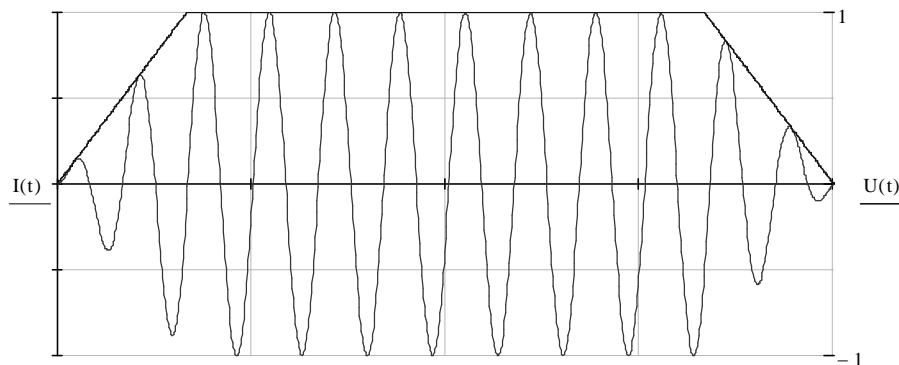


Рис. 5. Форма доплерівського сигналу при: $D_{\min} = 4$ мкм; $\zeta = 0,3$
В; $v = 0,14$ мм / с; $y = 0$; $t_1 = 2 \cdot T$.

Таким чином, запропонований метод вимірювання параметрів частинок має наступні діапазони застосування – для діаметра: $D = (4 \dots 40)$ мкм, для швидкості: $v = (4,5 \cdot 10^{-6} \dots 0,46)$ м / с у разі оптимальних параметрів вимірювальної лазерної доплерівської установки $H = 0,025$ м, $F = 0,25$ м, $\alpha = 6^\circ$, $\lambda = 0,6328$ мкм та $E = 10^3$ В / м.

Висновки. У результаті моделювання процесу вимірювання гідромеханічних і фізичних параметрів частинок за допомогою комп'ютерного дослідження обрано параметри експериментальної установки, а також розроблено алгоритм автоматизації вимірювань і визначено межі чутливості методу лазерної доплерівської інтерферометрії. Отримані результати вимірювання ефективного діаметру і дзета – потенціалу частинки використовують для контролю ефективності процесу коагуляції домішок хрому (Cr^{6+} , Cr^{3+}) при реагентному способі очищення стічних вод гальванічного виробництва.

Література

1. Мовчан С. И. Современные методы обработки и контроля качества сточных вод гальванических отделений промышленных пред-

приятый / С. И. Мовчан // Вода і водоочисні технології, 2007. – № 1. - С. 51 – 56.

2. Патент України № 50226 А. МПК⁷ G 01 N 15 / 00. Спосіб вимірювання швидкості і ефективного діаметра частинки / М. В. Морозов, С. І. Мовчан. – Заявка № 2001118059. Заявл. 26. 11. 2001. Друк. 15. 10. 2002, Бюл. № 10.

3. Мовчан С. І. Визначення швидкості, ефективного діаметра і дзета – потенціалу частинок домішок методом лазерної доплерівської інтерферометрії / С. І. Мовчан, М. В. Морозов // Вісник УДУВГП. Рівне, 2002. – Ч. 6. – Вип. 5 (18). - С. 126 – 131.

4. Патент України на корисну модель № 34874 А. МПК⁷ G 01 N 15 / 00. Спосіб вимірювання ефективного діаметру та концентрації частинок у розчині / М. В. Морозов, С. І. Мовчан – Заявка № 2008 03869. Заявл. 27. 03. 2008. Друк. 26. 08. 2008, Бюл. № 16.

5. Мовчан С. І. Технология контроля качества очистки сточных вод гальванического производства методом лазерной доплеровской интерферометрии / С. И. Мовчан, Н. В. Морозов // Науковий вісник будівництва. Вип. 47, Харків, ХДТУБА – ХОТБ, 2008. – С. 245 - 249.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ В ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

М. В. Морозов, С. І. Мовчан

Аннотация – На основе полученных экспериментальных данных формы доплеровского сигнала с выхода лазерного интерферометра, разработана методика математического моделирования процесса измерения гидромеханических параметров частиц примесей в водных растворах с использованием компьютерной среды программирования Math Cad.

THE METHOD FOR THE MEASURING PROCESS OF THE HYDRAULIC AND MECHANICAL PARAMETERS OF PARTICLES IN LASER DOPPLER INTERFEROMETRY

N. Morozov, S Movchan

Summary

The method for the process of modelling for measuring, calculating and defining the hydraulic and mechanical parameters of water solution particles by using Math Cad on the basis of received experimental data of Doppler signal types is offered.