

# МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ КЛАСИФІКАЦІЇ ТОВАРІВ

---

УДК 664.014/.019

**Світлана ШАПОВАЛ,  
Роман РОМАНЕНКО,  
Нінель ФОРОСТЯНА**

## ВИЗНАЧЕННЯ КАЛАМУТНОСТІ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

*Обґрунтовано використання поляризованого монохроматичного випромінювання газорозрядного лазера для визначення каламутності ліофобних дисперсних систем. Виведено робочі формули для визначення каламутності досліджуваного зразка, коефіцієнта екстинкції зразка та скляної кювети. Представлено схему дослідної установки й наведено алгоритм роботи та опрацювання результатів вимірювань.*

Важливим показником якості харчової дисперсної системи є наявність механічних домішок – завислих твердих частинок, або крапель, нерозчинних рідин. Їх допустима кількість може коливатися в широких межах, тому при виготовленні рідких і желеподібних продуктів харчування необхідно контролювати параметр каламутності як складову показників консистенції та зовнішнього вигляду продукту. Суспензії в питній воді можуть сприяти зростанню шкідливих мікроорганізмів і зменшувати ефективність хлорування, викликаючи небезпеку для здоров'я.

Завислі у воді тверді частинки порушують проходження світла та створюють кількісну характеристику води, тобто каламутність. Американська Асоціація охорони здоров'я (АРНА) дає таке її визначення: "чисельна характеристика оптичної властивості, яка викликає розсіювання й поглинання світла". Каламутність можна розглядати як характеристику відносної прозорості рідини, а її вимірювання – не пряме визначення кількості суспензії в рідині, а вимір величини розсіювання світла [1].

Каламутність – це результат розсіювання світла на завислих у рідині твердих частинках, яке залежить від їх розміру, форми й складу, а також від довжини хвилі падаючого світла. Зважаючи на це, більшість сучасних приладів для визначення каламутності використовує монохроматичне випромінювання [2].

Просторовий розподіл розсіяного світла визначається відношенням розміру часточки до довжини хвилі ( $\lambda$ ). Частинки, розміром менше довжини хвилі падаючого світла, дають майже симетричне його розсіювання. Зі збільшенням розмірів частинок інтерференційна картина зміщується у напрямку проходження падаючого світла. Однак переважна кількість рідких і желеподібних продуктів харчування мають набагато більші розміри завислих частинок, аніж довжина хвилі червоного світла (620–680 нм), що дає змогу використовувати для визначення каламутності монохроматичне випромінювання потужних і доступних газорозрядних лазерів.

Під час визначення фізико-хімічних властивостей рідких харчових продуктів, серед яких важливими показниками є каламутність і швидкість седиментації частинок, доцільно використовувати оптичні методи дослідження, особливо коли існує необхідність проведення великої кількості дослідів.

Сучасні інструменти визначають каламутність у широкому діапазоні – від високих до гранично низьких значень. Переважна кількість вимірювань проводиться в діапазоні 1 FTU (міжнародна одиниця каламутності) й нижче, тоді як більшість продуктів харчування мають каламутність у діапазоні від 0.5 до 4.3 FTU [2].

На сьогодні розроблено досить багато методів визначення каламутності, але вони майже всі налаштовані на фіксацію змін якості води – раптова зміна каламутності може вказувати на додаткове джерело забруднення. Рідкі та желеподібні продукти харчування через досить високі значення каламутності та кольорову неоднорідність мають значну похибку вимірювань [3, с. 248–326].

Мета роботи – розроблення експрес-методу визначення каламутності ліофобних харчових дисперсних систем.

На кафедрі інженерно-технічних дисциплін КНТЕУ, сумісно із вітчизняним виробником цифрової вимірювальної техніки – фірмою ІТМ, розроблено спосіб визначення каламутності дисперсних систем. Дослідження проведено на базі приладу ESPE-1 із газорозрядним лазером ЛГ-208А та фотодатчиками (кремнієві оптичні сенсори з частотою роботи 10 000 Гц). Частота обмежувалася не датчиком, а швидкістю роботи процесора універсального вимірювального приладу (УВКП).

Ліофобна дисперсна система послаблює випромінювання, що проходить через зразок, і присутні нерозчинені речовини нерівномірно розсіюють випромінювання в різних напрямках. Розсіювання випромінювання частинками цих речовин впливає на ослаблення так, що коефіцієнт загального спектрального ослаблення випромінювання

$\mu(\lambda)$  є сумою коефіцієнтів спектральної дифузії  $s(\lambda)$  і спектральної абсорбції  $\alpha(\lambda)$ . Отже, визначивши коефіцієнт спектральної абсорбції можна порахувати коефіцієнт екстинкції (послаблення) випромінювання ( $\tau$ ). У випадку, коли випромінювання монохроматичне, коефіцієнт екстинкції дорівнює коефіцієнту спектральної абсорбції:

$$\tau = \alpha_{\lambda=\text{const}}. \quad (1)$$

Знаючи коефіцієнт спектральної абсорбції  $\alpha(\lambda)$ , можна визначити коефіцієнт спектральної дифузії  $s(\lambda)$ .

Для визначення коефіцієнта спектральної абсорбції ліофобної дисперсної системи необхідно зачекати 15–30 с для седиментації великих частинок. Інколи можна видалити великі нерозчинні речовини фільтрацією, однак це може призвести до перешкод, тому на практиці видалити великі частинки досить важко. Проте згаданий вище показник легко фіксується УВКП. Ось чому в протоколі випробування результати визначення каламутності води необхідно надавати в порівнянні з каліброваним розчином.

Для калібрування дослідної установки на базі УВКП не можна використовувати харчові дисперсні системи через нестабільний хімічний склад і різні розміри дисперсних частинок, тобто їх каламутність може суттєво змінюватися. Також у харчових дисперсних системах, особливо ліофобних, занадто висока швидкість седиментації, тому прилади для визначення каламутності калібрують за розчином формазину.

Авторами апробовано метод калібрування установки для визначення каламутності на основі водних розчинів червоних пігментних чорнил для струминного принтера, оскільки формазин є отруйною речовиною.

Водні розчини пігментних чорнил мають стабільні показники каламутності, дуже низьку швидкість седиментації – до 5 %/год, а також доступні дані про розподіл пігментних частинок за розмірами [2]. Як еталонний та дослідний зразки використано розчини червоних пігментних чорнил фірми WWM.

Коефіцієнт екстинкції (спектральної абсорбції) світлового або електромагнітного випромінювання тілом визначають за формулою:

$$t = \frac{1}{d_{\text{зразка}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{зразка}} - I_0}, \quad (2)$$

де  $t$  – коефіцієнт екстинкції,  $\text{мм}^{-1}$ ;

$I_0$  – інтенсивність фонового світлового потоку, Лм;

$I_1$  – інтенсивність світлового потоку при увімкненому лазері без кювети зі зразком, Лм;

$I_{\text{зразка}}$  – інтенсивність світлового потоку після проходження зразка, Лм;

$d_{\text{зразка}}$  – товщина зразка, мм.

Інтенсивність світлового потоку ( $I_{\text{зразка}}$ ) в досліді виражено значенням датчика прямого світла ( $I_{\text{прям}}$ ). Інтенсивність фонового світлового потоку ( $I_0$ ) визначається експериментатором безпосередньо перед проведенням експерименту, ввімкнувши вимірювання та визначивши середній світловий потік із показань усіх трьох датчиків.

Складність проведення вимірювань у тому, що коефіцієнт екстинкції є сумою коефіцієнтів послаблення світлового потоку кюветою ( $t_{\text{кюв}}$ ) та зразком ( $t_{\text{зр}}$ ). Проте, оскільки нам необхідно визначити загальну складову послаблення випромінювання кюветою, то коефіцієнт екстинкції кювети можна легко виміряти, провівши додатковий експеримент:

$$t_{\text{кюв}} = \frac{2}{d_{\text{скла}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{прям\_кюв}} - I_0} + \frac{1}{d_{\text{кюв}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{нов}} - I_0}, \quad (3)$$

де  $t_{\text{кюв}}$  – коефіцієнт екстинкції кювети,  $\text{мм}^{-1}$ ;

$d_{\text{скла}}$  – товщина скла кювети, мм;

$d_{\text{кюв}}$  – ширина внутрішньої частини кювети, мм;

$I_0$  – інтенсивність фонового світлового потоку, Лм;

$I_1$  – інтенсивність світлового потоку при увімкненому лазері без кювети, Лм;

$I_{\text{прям\_кюв}}$  – інтенсивність світлового потоку після проходження кювети (показники датчика прямого світла), Лм;

$I_{\text{нов}}$  – інтенсивність світлового потоку після проходження повітря всередині кювети (показники датчика прямого світла), Лм.

Оскільки послабленням інтенсивності світлового потоку в повітрі на невеликій відстані можна знехтувати, тоді:

$$\frac{I_1 - I_0}{I_{\text{нов}} - I_0} = 1. \quad (4)$$

Підставивши значення виразу (4) у формулу (3), отримано:

$$t_{\text{кюв}} = \frac{2}{d_{\text{скла}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{прям\_кюв}} - I_0} + \frac{1}{d_{\text{кюв}}} \ln 1 = \frac{2}{d_{\text{скла}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{прям\_кюв}} - I_0} \quad (5)$$

Формула визначення коефіцієнта екстинкції зразка матиме вигляд:

$$t_{\text{зр}} = t - t_{\text{кюв}} = \frac{1}{d_{\text{зразка}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{зразка}} - I_0} - \frac{2}{d_{\text{скла}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{прям\_кюв}} - I_0} \quad (6)$$

Показник інтенсивності світлового потоку при увімкненому лазері без кювети з досліджуваним зразком можна вирахувати, знаючи розподіл інтенсивності світла дифракційною решіткою та показання датчика меншого максимуму. Якщо знайти розподіл інтенсивності світла залежно від кута дифракції  $\varphi$ , то можна, знаючи інтенсивність світла в будь-якій точці розподілу та кут  $\varphi$  поширення променя, визначити інтенсивність прямого (незаломленого) променя.

Нехай на дифракційну решітку перпендикулярно до її поверхні (тобто кут падіння  $\varphi=0$ ) падає плоскополяризована монохроматична хвиля з довжиною  $\lambda = 663$  нм.

Від елементарної зони щілини з номером  $n$  в напрямі, що визначається кутом  $\varphi$ , поширюватиметься хвиля, рівняння якої можна записати так:

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz). \quad (7)$$

Оскільки  $k(n-1)\sin\varphi$  описує зміну фази, обумовлену різницею ходу  $(n-1)\sin\varphi$  променя в напрямі  $\varphi$ , що виникає при переході від періоду з номером 1 до періоду з номером  $n$ , тоді:

$$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi. \quad (8)$$

Подальше виведення формули наводити недоцільно, тому що функція розподілу випромінювання детально розписана професором В. І. Найденом [4, с. 359–363].

Інтенсивність світла за решітками визначається добутком множника елемента решітки й множника решітки.

$$\sin\varphi = \pm \frac{I_0}{N} \lambda, \quad (9)$$

де  $N$  – ціле число – множник елемента дифракційної решітки.

Загальна залежність, згідно формул (8) і (9), визначається добутком двох функцій (рис. 1).

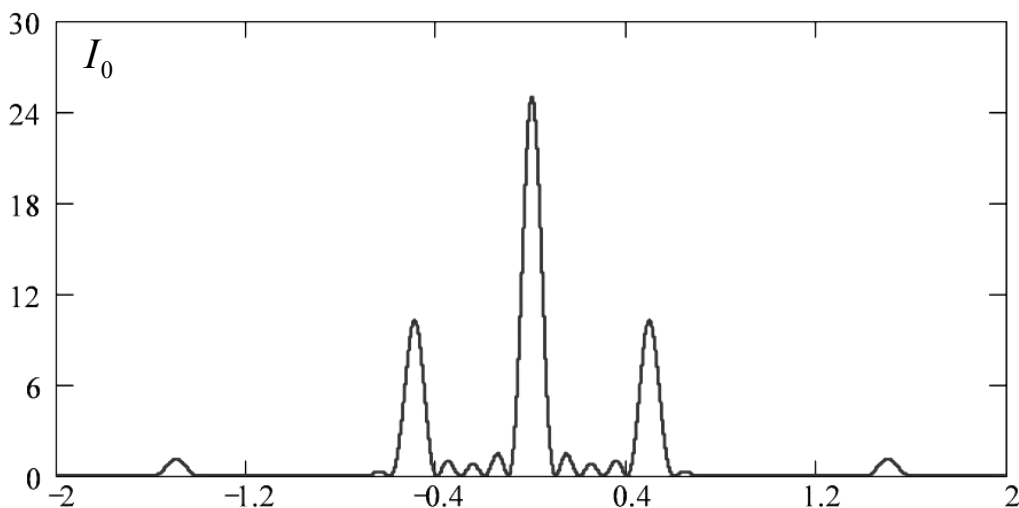


Рис. 1. Графік розподілу інтенсивності випромінювання  $\frac{b}{\lambda} \sin\varphi$  монохроматичної плоскополяризованої хвилі (газорозрядний лазер, лазерний випромінювач ESPE-1 з довжиною хвилі  $\lambda = 663$  нм)

Найбільший максимум функції досягається при  $\frac{b}{\lambda} \sin \varphi = 0$  і дорівнює 0.26533, або 26.5 % початкової інтенсивності світлового потоку. Перший максимум функції досягається при  $\frac{b}{\lambda} \sin \varphi = 0.5$  і дорівнює 0.11547, або 11.5 % початкової інтенсивності світлового потоку.

Підставивши отримані значення у формулу (6), отримуємо формулу для визначення коефіцієнта екстинкції (спектральної дифузії):

$$t_{зр} = \frac{1}{d_{зразка}} \ln \frac{2.298 \cdot I_{1\_max} - I_0}{I_{зразка} - I_0} - \frac{2}{d_{скла}} \ln \frac{2.298 \cdot I_{1\_max} - I_0}{I_{прям\_кюв} - I_0}, \quad (10)$$

де 2.298 – коефіцієнт перерахунку інтенсивності світлового потоку на датчику першого максимуму;

$I_{1\_max}$  – інтенсивність світлового потоку на датчику першого максимуму.

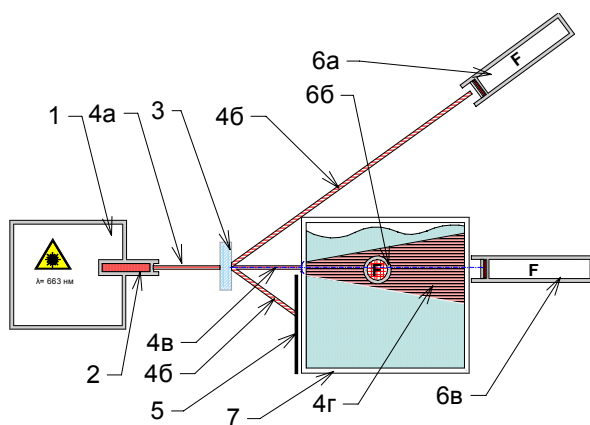
Каламутність досліджуваних зразків визначено за формулою:

$$S = k \cdot t_{зр}, \quad (11)$$

де  $t$  – коефіцієнт екстинкції,  $\text{мм}^{-1}$ ;

$k$  – коефіцієнт перерахунку у відповідні одиниці вимірювання (для каоліну – 3.308 мг/л; для міжнародних одиниць – 0.43 FTU за формазином).

Прозорість дисперсної системи визначено експериментальним методом, який ґрунтується на ГОСТ 3351–74 [5], використовуючи лазерний випромінювач ESPE-1 із довжиною хвилі 663 нм, універсальний вимірювальний комп'ютерний прилад, розроблений фірмою ІТМ для наукових досліджень і комплекту цифрових оптичних датчиків, градуйованих відповідно до червоної шкали люксметра Ю117. Схему установки наведено на *рис. 2*.



*Рис. 2.* Схема установки для визначення каламутності:

1 – оптична лазерна установка ESPE-1; 2 – лазерний випромінювач ЛГ208 другого класу; 3 – дифракційна решітка 1:250; 4 – лазерний промінь (4а – промінь до проходження дифракційної решітки, 4б – промінь першого максимуму, 4в – промінь головного максимуму, 4г – конус розсіювання променя у досліджуваному зразку);

5 – непрозорий екран; 6 – оптичні датчики (6а – контрольний датчик променя першого максимуму; 6б – нефелометричний датчик; 6в – датчик прямого світла); 7 – кювета з досліджуваним зразком

Дослідження каламутності зразка на установці здійснено за алгоритмом:

1. Прямокутну кювету (7) із високоякісного оптичного скла ретельно миють і прополіскують у дистильованій воді не менше трьох разів.

2. Чисту кювету поміщають до ультразвукової ванни на 4–5 хв.

3. Робочі грані кювети полірують силіконовим мастилом.

4. Експериментатор, не вмикаючи лазерний випромінювач, вмикає вимірювальний прилад на 23–30 с без кювети для визначення освітленості зони проведення експерименту ( $I_0$ ). Значення освітленості визначають як середнє між показаннями усіх трьох датчиків освітленості.

5. Порожню кювету встановлюють перпендикулярно до центрального лазерного променя і визначають інтенсивність світлового потоку після проходження кювети – показники датчика прямого світла ( $I_{\text{прям. кюв}}$ ).

6. Досліджувану рідину наливають до кювети.

7. На лазерному випромінювачі ESPE-1 виставляють поляризатор і дифракційну решітку 1:250.

8. Установлюють кювету чітко перпендикулярно лазерному променю (4a).

9. Вмикають початок вимірювань на панелі управління експериментом програми "Лабораторія ІТМ".

10. Час експерименту встановлюється відповідно до швидкості седиментації досліджуваного зразка (орієнтовно це можна визначити за зростанням показників датчика прямого світла та нефелометричного датчика).

11. Після стабілізації показників зазначених датчиків експериментатор зупиняє вимірювання. Слід пам'ятати, що універсальний вимірювальний прилад працює з частотою 10 000 Гц, тому за кожну секунду експерименту отримуємо 60 000 нових значень. Це дещо ускладнює роботу комп'ютера і може викликати збої табличного процесора (наприклад, *MS Excel*).

12. Отримавши графіки показників оптичних датчиків, експериментатор зберігає повністю експеримент у програмі "Лабораторія ІТМ" або робить фотографію екрана (клавіша *Print Screen* на клавіатурі комп'ютера). Останню слід робити лише в тому випадку, коли опрацювання результатів експерименту відбуватиметься на комп'ютерах, де не встановлено програму "Лабораторія ІТМ".

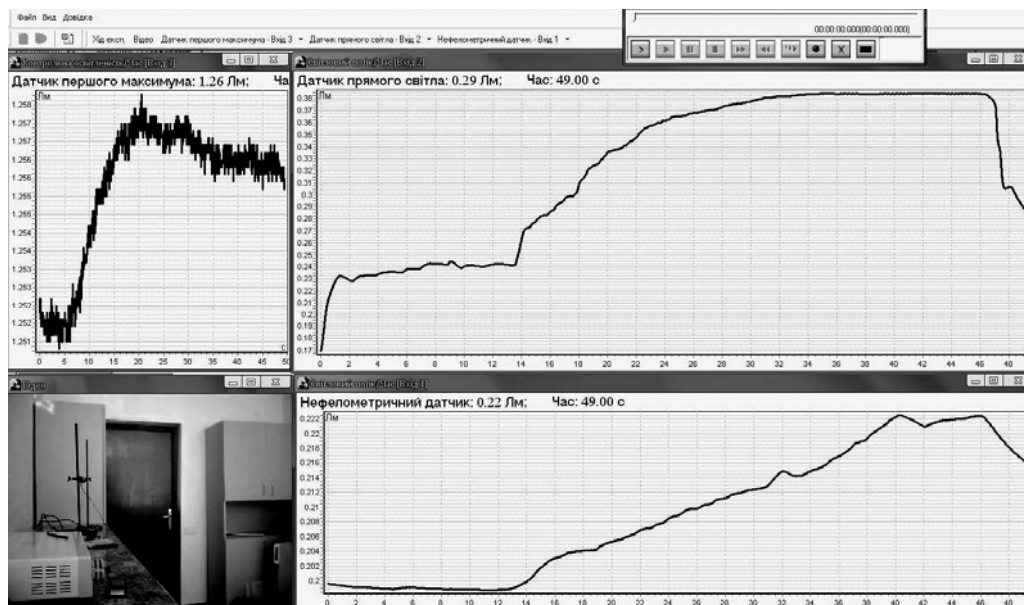
13. Для опрацювання результатів вимірювання весь масив даних імпортується до програми роботи з таблицями (кнопка "Імпорт у *Excel*" у вікні програми "Лабораторія ІТМ"). Інтерполяція показань датчиків і виведення функції зміни освітленості в часі для визначення каламутності не рекомендується. Якщо експериментатор має на меті не лише визначити каламутність, а й оцінити швидкість седиментації дисперсної системи, тоді доцільно встановлення математичної залеж-

ності показань світлового потоку датчика прямого світла в часі, проте лише після математико-статистичної обробки цих показань і відкидання зон нерівномірності, обумовлених вмиканням-вимиканням лазера.

14. Визначення каламутності дисперсної системи проводять за формулою (11) у конкретний момент часу експерименту.

На *рис. 3*. наведено приклад вікна програми "Лабораторія ІТМ" для роботи з установкою. У верхній лівій частині екрана розміщено панель управління експериментом.

Вікно програми розділене на 4 нерівні частини. 2/3 екрана займають графіки показань найважливіших датчиків – нефелометричного та датчика прямого світла. У лівій частині вікна розташовано графік показань датчика першого максимуму та вікно відеозапису експерименту. Можливість програми "Лабораторія ІТМ" записувати відео експерименту синхронно з показаннями всіх датчиків дає змогу переглянути хід проведення дослідження, виявити помилки та неточності постановки дослідження, а також явища, які впливали на точність дослідження, оскільки безпосередньо в процесі визначення каламутності, який триває від 30 до 120 с, все зазначене вище виконати неможливо.



*Рис. 3.* Приклад зняття показників оптичних датчиків для визначення каламутності дисперсних систем (вікно програми "Лабораторія ІТМ")

На *рис. 3* видно, що показання датчика першого максимуму незначно коливаються, проте, якщо повернутися до схеми установки визначення каламутності (див. *рис. 2*), можна зазначити, що оскільки між дифракційною решіткою та згаданим вище датчиком немає досліджуваного зразка, то значення світлового потоку першого максимуму не повинно змінюватися. Ці коливання можуть спричинитися



кількома явищами: *по-перше* – це зміна світлового потоку лазерної установки ESPE-1 (не дивлячись на стабільність роботи газорозрядних лазерів, виробники допускають коливання світлового потоку  $\pm 3\%$ ); *по-друге*, за час проведення експерименту (50 с) може змінитись освітленість зони проведення експерименту; *по-третє*, різке зростання показників із п'ятої по двадцяту секунду може зумовлюватися розсіяним зразком випромінювання. Як доказ останньої версії можна навести різкий стрибок показань нефелометричного датчика (датчика розсіяного випромінювання) як раз на двадцятій секунді експерименту, коли показання датчика першого максимуму сягали свого найвищого значення. Однак оскільки коливання значень світлового потоку першого максимуму не перевищують  $1.003\%$ , то ці показники не можуть внести суттєву похибку в результати експерименту. Окрім того, формулою розрахунку каламутності (10) передбачається визначення світлового потоку головного максимуму через такий першого максимуму, що обумовлює компенсацію будь-яких коливань.

Із наведеного вище прикладу виділимо найголовніший графік – показання датчика прямого світла.

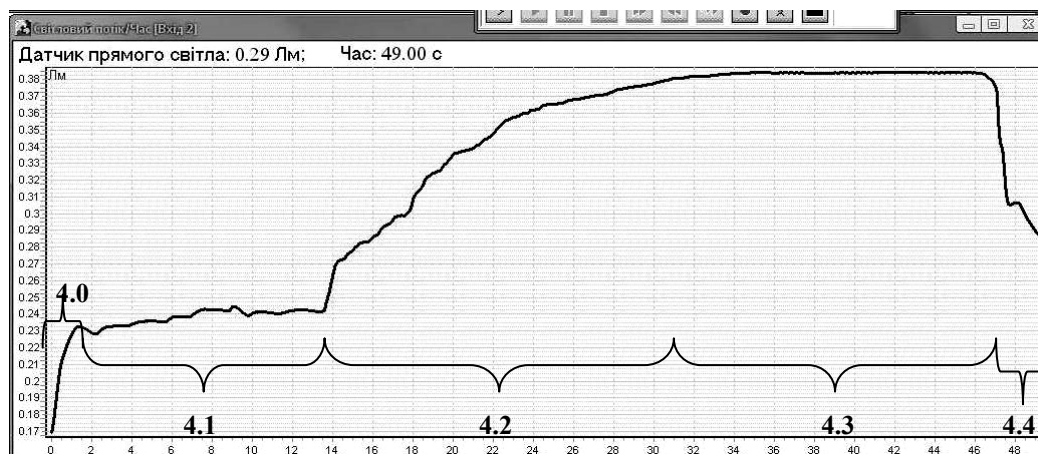


Рис. 4. Вікно графіка показників датчика прямого світла

У графіку показників світлового потоку датчика прямого світла можна виявити декілька зон:

4.0 – зона стабілізації роботи датчика; 4.1 – зона інтенсивності світлового потоку природного фону; 4.2. – зона підвищення інтенсивності світлового потоку – зона із вмиканням лазерного випромінювача (різке підвищення інтенсивності світла на початку зони), поступове підвищення інтенсивності світлового потоку пов'язане із седиментацією частинок і зниженням каламутності рідини, стрибки показань датчика прямого світла можливі через явище світлового тиску; 4.3. – зона стабільності показників – пов'язана із суттєвим зменшенням швидкості седиментації частинок і стабілізацією показників каламутності дисперсної системи. Саме в цій зоні, якщо інше не

було метою досліджень, рекомендовано визначати каламутність дисперсної системи; 4.4. – зона завершення експерименту (вимикання лазерного випромінювача та повернення до значень фонового світлового потоку).

Отже, розроблений метод визначення каламутності дисперсних систем уможлиблює не лише точно та швидко визначати оптичні властивості рідин в обмеженому діапазоні каламутності, а й створювати математичні моделі швидкості седиментації досліджуваної системи. Також перспективним є використання методу в навчальному процесі, оскільки він дає змогу наочно продемонструвати студентам явища, що відбуваються в дисперсних системах від моменту припинення механічної дії (перемішування) до припинення седиментації великих частинок.

Автори висловлюють вдячність директору фірми ІТМ, канд. техн. наук Ю. В. Литвинову за технічну та інформаційну підтримку під час розробки методу.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Вікіпедія*. Вільна енциклопедія. Спектральний аналіз. Режим доступу : [http://uk.wikipedia.org/wiki/Спектральний аналіз](http://uk.wikipedia.org/wiki/Спектральний_аналіз).
2. *Екоінструмент*. Теория и практика измерения мутности. Режим доступа : [http://www.ecoinstrument.com.ua/index.php?option=com\\_content&view=article&id=73:service-td&catid=41:supplementinfo&Itemid=81](http://www.ecoinstrument.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=73:service-td&catid=41:supplementinfo&Itemid=81).
3. *Фридришберг Д. А.* Курс коллоидной химии / Д. А. Фридришберг. — Л. : Химия, 1974. — 352 с.
4. *Найденко В. І.* Фізика та методи дослідження сировини і матеріалів : навч. посіб. / В. І. Найденко. — К. : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2004. — 509 с.
5. ГОСТ 3351–74. Вода питьевая. Методы определения вкуса, запаха, цветности и мутности. — М. : Изд-во стандартов, 2003. — 7 с.

*Стаття надійшла до редакції 30.09.2011.*

*Шаповал С., Романенко Р., Форостяная Н. Определение мутности дисперсных систем лазерным излучением. Обосновано использование поляризованного монохроматического излучения газоразрядного лазера для определения мутности лиофобных дисперсных систем. Выведены рабочие формулы для определения мутности исследуемого образца, коэффициента экстинкции образца и стеклянной кюветы. Представлена схема опытной установки, приведены алгоритм работы и обработка результатов измерений.*

*Shapoval S., Romanenko R., Forostyana N. Defining turbidity of disperse systems with polarized laser. The article justified the use of a polarized monochromatic light gas-discharge laser to determine the turbidity of disperse systems. It described the formulas for determining the turbidity of the sample, the extinction coefficient of the sample and the glass cell. The scheme of experimental installation is provided and an algorithm of work and processing of measurement results are shown.*