

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кватернюк Сергій Михайлович

УДК 504.064.38

**СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ТА
АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЗАСІБ КОНТРОЛЮ КОНЦЕНТРАЦІЙ
ЧАСТИНОК ПОЛІДИСПЕРСНИХ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2010

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
ПЕТРУК Василь Григорович,
Вінницький національний технічний університет,
директор інституту екології та екологічної
кібернетики, завідувач кафедри екології та екологічної
безпеки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ПОРЄВ Володимир Андрійович,
Національний технічний університет України “Київський
політехнічний інститут”, завідувач кафедри наукових,
аналітичних та екологічних приладів і систем

доктор технічних наук, с.н.с.
МУРАВСЬКИЙ Леонід Ігорович,
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка
НАН України, м. Львів, завідувач відділу
оптико-електронних інформаційних систем.

Захист відбудеться “ 15 ” 10 2010 р. о 9³⁰ год. на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 05.052.02 у Вінницькому національному технічному університеті за
адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГУК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного
університету за адресою: 21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “ 14 ” 09 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С. В. Павлов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Теоретичні та практичні аспекти автоматизованого контролю параметрів водних об'єктів та навколишнього природного середовища в цілому розвинуті недостатньо, а інтегральні показники, за якими оцінюється їх стан, у значній мірі є відносними і суб'єктивними. При цьому відомі методи і засоби контролю концентрацій частинок полідисперсних водних середовищ (ПВС) не забезпечують високу вірогідність контролю, оскільки не дозволяють у повній мірі порівняти оптико-фізичні параметри частинок різних типів, що визначаються геометричними розмірами, формою, внутрішньою

будовою, анізотропністю, спектральними і поляризаційними властивостями. А це, у свою чергу, призводить до низької достовірності розпізнавання частинок ПВС певних типів, зокрема, частинок фітопланктону, визначення та контролю їх концентрацій, що суттєво ускладнює адекватну оцінку рівня забруднення водних об'єктів. Отже, для підвищення вірогідності контролю виникає необхідність розроблення нового спектрополяриметричного методу та автоматизованого засобу контролю, які б дозволили більш точно визначати концентрацію частинок певного типу у ПВС, а, відповідно, оцінювати стан забруднення водних об'єктів та якість поверхневих вод.

Значний вклад у розробку оптичних методів і засобів контролю параметрів полідисперсних середовищ внесли роботи Ван де Хюлста Г., Борена К., Хафмена Д., Рвачова В.П., Шифріна К.С., Іванова А.П., Чайковського А.П., Пришивалко А.П., Зорі А.А., Петрука В.Г., Кожем'яко В.П., Сахновського М.Ю., Ушенка О.Г., Тучіна В.В., Лопатіна В.Н., Мальцева В.П. та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в межах міжнародних україно-білоруських проектів з Інститутом фізики ім. Степанова НАН Республіки Білорусь на замовлення Державного фонду фундаментальних досліджень у 2007–2008 рр. (№ ДР 0107U008337) та Департаменту міжнародного співробітництва та євроінтеграції МОНУ у 2008–2010 рр. (№ ДР 0108U005178), а також держбюджетних науково-дослідних робіт Вінницького національного технічного університету на замовлення МОНУ “Дослідження спектрофотометричних характеристик світлорозсіювальних середовищ для екологічного моніторингу довкілля” у 2005–2007 рр. (№ ДР 0105U002417), “Дослідження індикатрис розсіяння для локації і контролю неоднорідних середовищ у екологічному моніторингу” у 2008–2010 рр. (№ ДР 0108U000651), у виконанні яких автор брав безпосередню участь як відповідальний виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення вірогідності контролю концентрацій частинок ПВС на основі нового спектрополяриметричного методу та автоматизованого засобу контролю.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати такі задачі:

- здійснити аналіз існуючих методів та засобів контролю концентрацій частинок ПВС;
- вдосконалити математичні моделі перенесення поляризованого випромінювання об'єктом контролю та первинним вимірювальним перетворювачем;
- розробити спектрополяриметричний метод контролю концентрацій частинок ПВС;
- розробити автоматизований засіб контролю концентрацій частинок ПВС на основі спектрополяриметричного методу та дослідити його метрологічні характеристики;
- обґрунтувати вибір мінімально можливої кількості оптимальних значень характеристичних довжин хвиль та кутів обертання поляризатора і аналізатора для підвищення швидкодії засобу контролю;
- розробити алгоритмічне і програмне забезпечення засобу контролю концентрацій частинок ПВС для оцінювання екологічних та санітарно-гігієнічних показників якості поверхневих вод;

– удосконалити методику експериментальних досліджень для здійснення контролю забруднення водних об'єктів, у яких концентрацію частинок певного типу було визначено за допомогою розробленого засобу контролю.

Об'єкт досліджень – процес контролю концентрацій частинок ПВС.

Предмет дослідження – концентрації частинок ПВС та метрологічні характеристики автоматизованого засобу їх контролю за спектрополяри-метричним методом.

Методи дослідження. У роботі використані методи теорії перенесення випромінювання у ПВС з врахуванням особливостей оптико-фізичних параметрів їх дисперсних частинок для розроблення математичної моделі перенесення поляризованого випромінювання об'єктом контролю; методи математичного моделювання і статистики для опрацювання експериментальних результатів; методи теорії вимірювань, контролю та похибок для визначення вірогідності контролю концентрацій частинок ПВС, а також для оцінювання похибок.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше запропоновано спектрополяриметричний метод контролю концентрацій частинок ПВС, який полягає у порівнянні з допомогою розробленого автоматизованого засобу контролю масивів спектрополяриметричних зображень частинок, отриманих *in vitro* ПЗЗ-камерою в заданому діапазоні зміни довжин хвиль та кутових положень поляризатора і аналізатора, що дає можливість підвищити вірогідність контролю концентрацій частинок ПВС.

2. Вдосконалено, на основі методу Монте-Карло і гібридної апроксимації, математичні моделі перенесення поляризованого випромінювання об'єктом контролю та первинним вимірювальним перетворювачем з врахуванням форми і внутрішньої структури частинок, їх спектральних і поляризаційних властивостей, що дозволило підвищити достовірність розпізнавання типу частинок ПВС.

3. Вдосконалено математичну модель оцінювання впливу пробопідготовки, температури та оптико-геометричних параметрів первинного вимірювального перетворювача, а також факторів, які впливають на формування спектрополяриметричних зображень, що дозволило зменшити методичну складову невизначеності вимірювань концентрацій частинок ПВС.

4. Дістав подальшого розвитку спектрополяриметричний метод контролю концентрацій частинок ПВС шляхом обґрунтування вибору із встановленого діапазону мінімальної кількості значень характеристичних довжин хвиль пігментів та кутових положень поляризатора і аналізатора, що дозволяє зменшити масив спектрополяриметричних зображень частинок та підвищити швидкодію при заданому значенні вірогідності контролю.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні засобів контролю концентрацій частинок та методик оцінювання стану ПВС. До результатів, одержаних у дисертаційній роботі, що мають практичну цінність, належать:

1. Удосконалено конструкцію оптичного первинного перетворювача, розроблено структурну схему та макетні зразки автоматизованого засобу контролю концентрацій частинок ПВС.

2. Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення автоматизованого засобу контролю концентрацій частинок ПВС для впровадження у держуправліннях охорони навколишнього природного середовища та закладах санітарно-гігієнічної експертизи з метою оцінювання екологічних та санітарно-гігієнічних показників якості поверхневих вод.

3. Удосконалено методику та проведено експериментальні дослідження для здійснення контролю забруднення водних об'єктів, у яких концентрації частинок певних типів було визначено за допомогою розробленого засобу контролю.

За безпосередньою участю автора розроблено і впроваджено окремі результати дисертаційної роботи:

1) у Держуправлінні охорони навколишнього природного середовища у Вінницькій області;

2) у Вінницькій міській санітарно-епідеміологічній станції;

2) у навчально-методичному процесі Вінницького національного технічного університету, зокрема, для студентів спеціальності 6.040106 “Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування”.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно або при його безпосередній участі. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, такий: проведено аналіз існуючих методів та засобів контролю ПВС [3]; здійснено математичне моделювання індикатрис розсіювання частинок ПВС [2, 7, 12], спектрополяриметричних зображень частинок ПВС методом Монте-Карло [5] та перенесення поляризованого випромінювання у ПВС [10, 13]; проаналізовано спектральні характеристики ПВС [19]; запропоновано спектрополяриметричний метод [6, 8, 9] та розроблено автоматизований засіб контролю [4, 17, 18]; розроблено структурні схеми засобів контролю ПВС [1, 14, 16, 20]; удосконалено методику експериментальних досліджень концентрацій частинок ПВС [11, 15, 21].

Апробація результатів дисертації. Викладені у дисертації положення доповідалися на 20 наукових конференціях та симпозіумах: IV Міжнародна науково-практична конференція “МНПК КСАВП-2005” (м. Хмельницький, 2005 р.); VIII та IX Міжнародні науково-технічні конференції “Контроль і управління в складних системах” (м. Вінниця, 2005 р., 2008 р.); III та IV Міжнародні конференції по оптоелектронним інформаційним технологіям “PHOTONICS-ODS” (м. Вінниця, 2005 р., 2008 р.); XIII Міжнародна науково-технічна конференція з автоматичного управління “Автоматика-2006” (м. Вінниця, 2006 р.); V Міжнародна конференція “ІНТЕРНЕТ-ОСВІТА-НАУКА” (м. Вінниця, 2006 р.); XXII Міжнародна науково-практична конференція “Використання лазерів у медицині та біології” (м. Ялта, 2007 р.); III Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування” (м. Вінниця, 2007 р.); 12-та Міжнародна молодіжна наукова школа з оптики, лазерної фізики і біофотоніки (м. Саратов, Росія, 2008 г.). I та II Міжнародні науково-практичні конференції “Всеукраїнський з’їзд екологів” (м. Вінниця, 2006 р., 2009 р.), VII Міжнародна наукова конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Географія, геоекологія, геологія: досвід наукових досліджень” (м. Дніпропетровськ, 2010 р.), XIII Міжнародна науково-практична конференція “Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2010” (м. Харків, 2010 р.), а також XXXIV-XXXIX науково-технічні конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів Вінницького національного технічного університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області (м. Вінниця, 2005–2010 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 21 науковій публікації, у тому числі 9 статтях у фахових журналах, що входять до переліку ВАК України, 10 тезах доповідей і статтях у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій та 2 патентах на корисну модель.

Структура та об’єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів (які містять 57 рисунків і 11 таблиць), висновків, 9 додатків і списку використаних літературних джерел (155 бібліографічних посилань). Загальний обсяг дисертації складає 211 сторінок, з яких основний зміст викладено на 150 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету та завдання дослідження. Висвітлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, конкретну участь автора, апробацію результатів та структуру дисертації.

У першому розділі розглянуто особливості ПВС як об'єктів контролю, проаналізовано експериментальні методи контролю концентрацій частинок ПВС та здійснено їх класифікацію. Здійснено аналіз точних та наближених теоретичних методів розв'язку прямої і зворотної задачі теорії перенесення поляризованого випромінювання у ПВС. Проаналізовано параметри сучасних промислових засобів контролю концентрацій частинок ПВС. У результаті здійсненого аналізу встановлено необхідність в подальшому розвитку оптичних методів, розробці автоматизованих засобів та створенні експериментальних

методик контролю концентрацій частинок ПВС, які дозволяють врахувати особливості їх форми і внутрішньої структури, спектральні і поляризаційні властивості, а тому більш точно розпізнавати частинки певного типу. У підсумку констатується необхідність розроблення спектрополяриметричного методу контролю концентрацій частинок ПВС та автоматизованого засобу контролю на його основі, що дозволить підвищити вірогідність контролю концентрацій частинок ПВС.

Другий розділ присвячено розробленню та аналізу математичних моделей перенесення випромінювання об'єктом контролю та первинним вимірювальним перетворювачем. Теорія Мі, що застосована для моделювання однорідних частинок ПВС з формою близькою до сферичної, є неприйнятною для аналізу частинок більш складної форми та внутрішньої будови. Наближення геометричної оптики та дифракції Фраунгофера дозволило досліджувати перенесення випромінювання однорідними частинками складної форми, зовнішня поверхня яких моделювалась за допомогою овалу Кассіні.

Більшість частинок ПВС неоднорідні і володіють складною формою. Їх вміст можна описати, як основне середовище з численними включеннями та ядром. Математичну модель індикатриси розсіювання частинок ПВС, що містять ядро та гранули, удосконалено на основі наближення Релея-Ганса-Дебая

$$\begin{aligned} \langle |S_1(\theta)|^2 \rangle = & \left| \frac{2}{3} \rho_c^3 \right|^2 \left(|(m_n - 1)h_s(\rho_c, \theta) + f_1(m_{i\text{core}} - m_i)h_s(\rho_{\text{core}}, \theta) + \right. \\ & \left. + f_2(m_g - m_c)h_s(\rho_g, \theta)h_s(\rho_c - \rho_g, \theta)|^2 + |f_2(m_g - m_c)h_s(\rho_g, \theta)|^2 [1 - h_s^2(\rho_c - \rho_g, \theta)] / N \right), \end{aligned} \quad (1)$$

де N – кількість гранул; V_c , V_g , V_{core} – об'єм частинки, гранули та ядра відповідно; ρ_c , ρ_g , ρ_{core} – дифракційні параметри частинки, гранули та ядра; m_n , m_g , $m_{i\text{core}}$ – відносний показник заломлення частинки, гранули та ядра; $f_1 = NV_{\text{core}} / (V_c)$ – об'ємна частина ядра; $f_2 = NV_g / (V_c)$ – об'ємна частина гранул; h_s – формфактор. Здійснено моделювання індикатриси розсіювання частинок ПВС складної структури з різними параметрами гранул та ядра (рис. 1).

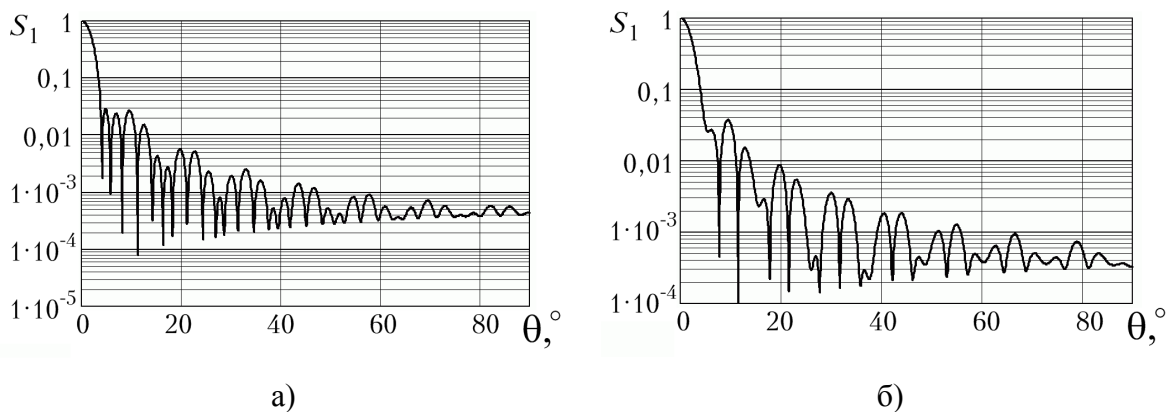


Рис. 1. Індикатриси інтенсивності розсіяного випромінювання частинки ПВС за наближенням РГД при різних значеннях відносного показника заломлення ядра а) – 1,05; б) – 1,1

Крім того, вдосконалено математичні моделі перенесення поляризованого випромінювання у ПВС на основі методу Монте-Карло і гібридної апроксимації, що дало можливість врахувати особливості форми і внутрішньої будови їх частинок, їх спектральні та поляризаційні властивості. Зовнішня поверхня частинки моделюється за допомогою геометричної оптики та дифракції Фраунгофера, а світлорозсіювання ядра та гранул визначається індикатрисами, розрахованими за теорією Мі (для сферичних включень) та методом дискретних диполів (для включень складної форми). На основі отриманих s- і p- компонент випромінювання розраховано параметри Стокса на виході системи (рис. 2) та елементи матриці Мюллера у кожній точці зображення.

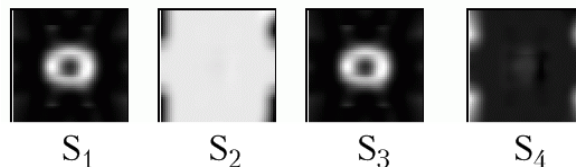


Рис. 2. Результати моделювання спектрополяриметричних зображень частинок ПВС для параметрів Стокса на виході системи

Проаналізовано послідовну трансформацію отриманих спектрополяриметричних зображень у первинному вимірювальному перетворювачі та оптичній системі засобу контролю до входу ПЗЗ-камери. На основі результатів моделювання спектрополяриметричних зображень частинок ПВС можна зробити висновок, що вони дають значно більше інформації про форму, структуру, анізотропність, спектральні та поляризаційні характеристики частинок у порівнянні з інтегральними спектрофотометричними параметрами. А тому порівняння масивів спектрополяриметричних зображень дозволить більш точно розпізнати тип частинок ПВС та визначити їх концентрації.

У **третьому розділі** розроблено спектрополяриметричний метод контролю концентрацій частинок ПВС та автоматизований засіб на його основі, структурна схема якого наведена на рис. 3. Суть спектрополяриметричного методу контролю концентрацій частинок ПВС полягає у наступному. Частинок ПВС мають характерні особливості форми, структури, анізотропності, спектральних та поляризаційних властивостей. Для визначення кількості частинок певного типу N_{zi} у вимірювальній кюветі необхідно вірно розпізнати частинки та підрахувати їх кількість. Для цього у проточній вимірювальній кюветі *in vitro* за допомогою ПЗЗ-камери в заданому діапазоні зміни довжин хвиль пігментів та кутових положень поляризатора і аналізатора отримують масив спектрополяриметричних зображень частинок ПВС. Далі необхідно здійснити первинну обробку отриманих зображень з ПЗЗ камери та виділити зображення окремих частинок. Для отримання достатньої роздільної здатності зображень використано оптичну систему мікроскопу. Для розпізнавання частинок певних типів необхідно здійснити порівняння масивів спектрополяриметричних зображень частинок ПВС. Після цього підраховують кількість частинок певного типу у первинному вимірювальному перетворювачі і визначають концентрацію частинок. Чисельна концентрація частинок певного типу у ПВС визначається відношенням кількості частинок до об'єму первинного вимірювального перетворювача. Порівнюючи отримане значення з нормою, приймається рішення "придатний-непридатний". Оскільки параметри ПВС суттєво залежать від температури, до вимірювальної кювети підключено цифровий сенсор температури, а термостатом підтримується стала температура об'єкту контролю.

Необхідні для отримання спектрополяриметричних зображень довжини хвиль джерела випромінювання та кути обертання елементів поляризаційної системи встановлюються кроковими двигунами, що керуються від мікроконтролера. В залежності від виконання автоматизованого засобу контролю у якості джерела випромінювання може використовуватись монохроматор чи лінійка над'яскравих світлодіодів з вузькосмуговими фільтрами.

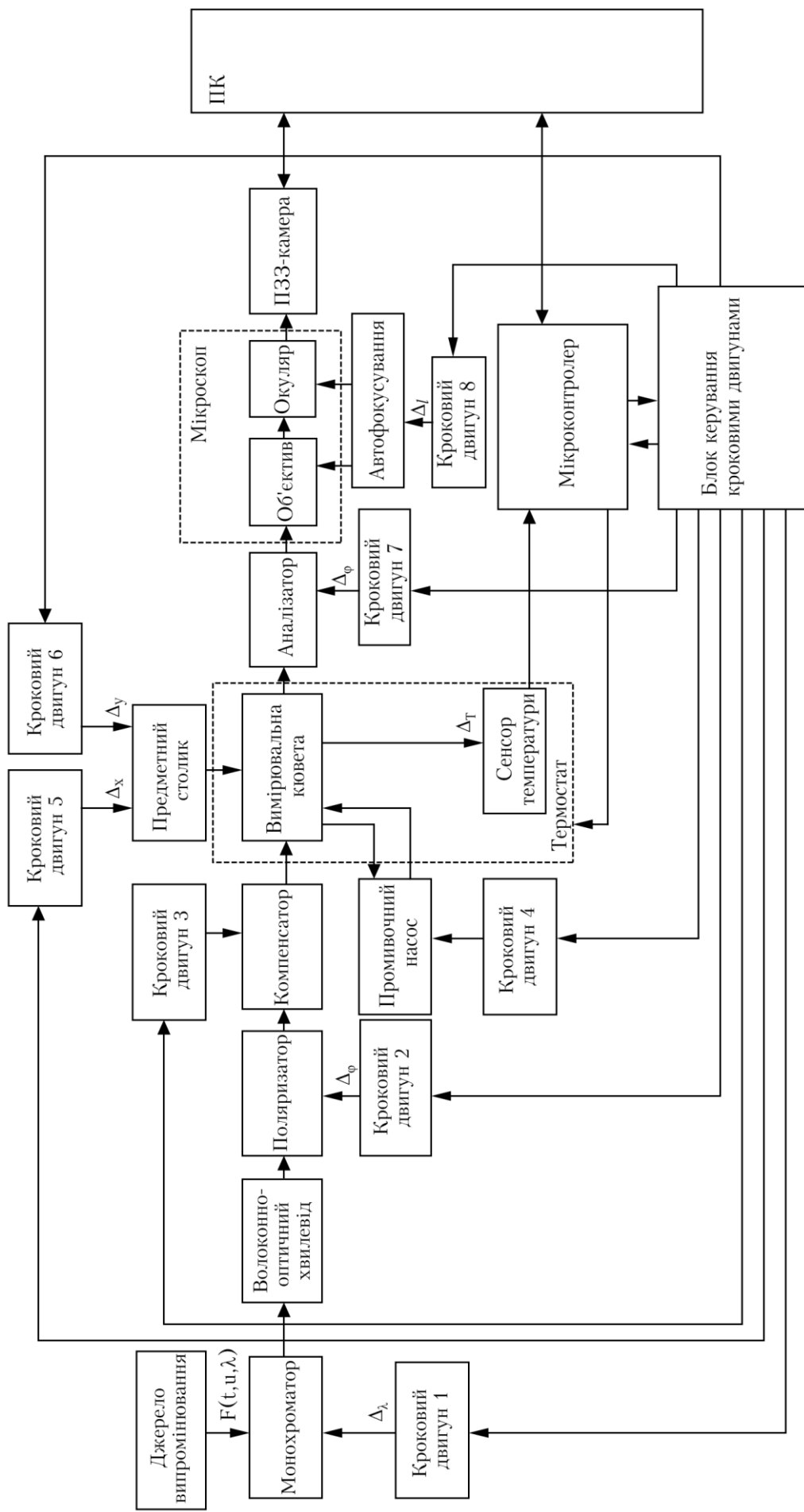


Рис. 3. Структурна схема автоматизованого засобу контролю концентрації частинок ПВС за спектрополяриметричним методом

Вимірювання концентрації частинок ПВС за спектрополяриметричним методом є опосередкованим. Безпосередньо вимірюється освітленість світлочувливих елементів матриці ПЗЗ-камери $E_{\ddot{a}\ddot{o},XY\dot{D}\zeta\zeta}$, що перетворюється у цифрове зображення $F_{XY\dot{I}\zeta\zeta}$ після обробки якого і визначається концентрація частинок ПВС певного типу. Інформативним сигналом у вимірювальному каналі є світловий потік, який проходить від джерела випромінювання через всі блоки до ПЗЗ-камери та визначає освітленість її елементів.

Основними факторами, що визначають мінімальні розміри частинок ПВС, концентрація яких може контролюватись за допомогою даного засобу контролю є роздільна здатність ПЗЗ камери, а також параметри проточної вимірювальної кювети та оптичної системи мікроскопу. На основі цього розраховане значення мінімального розміру частинок ПВС для розробленого засобу контролю складає 0,98 мкм. Загальна похибка вимірювання концентрацій частинок ПВС є функцією багатьох змінних, оскільки на точність вимірювального перетворення впливають різні фактори (рис.4).

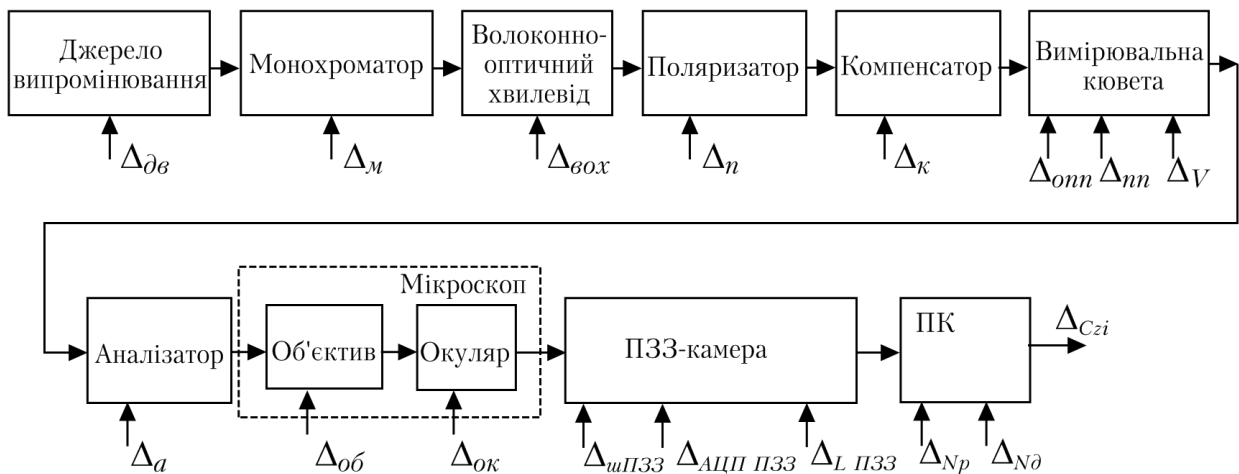


Рис. 4. Похибки у вимірювальному каналі засобу контролю концентрацій частинок ПВС

Основні похибки, що виникають під час вимірювального перетворення такі: $\Delta_{\ddot{a}\ddot{a}}$ – за рахунок нестабільності у часі світлового потоку джерела випромінювання; $\Delta_{\dot{\epsilon}}$ – оптичної системи монохроматора; $\Delta_{\ddot{a}\ddot{o}\ddot{o}}$ – волоконно-оптичного хвилеводу; $\Delta_{\dot{d}}$, $\Delta_{\dot{\epsilon}}$, $\Delta_{\dot{f}}$ – встановлення азимутальних кутів поляризатора, компенсатора та аналізатора; $\Delta_{\dot{i}\dot{d}\dot{d}}$ – оптичного первинного перетворювача – вимірювальної кювети за рахунок перевідбивання, неоднорідностей та дефектів; $\Delta_{\dot{d}\dot{d}}$ – пробопідготовки; Δ_V – встановлення об'єму проточної вимірювальної кювети; $\Delta_{\dot{i}\dot{a}}$, $\Delta_{\dot{i}\dot{\epsilon}}$ – елементів оптичної схеми мікроскопа; $\Delta_{\dot{f}\dot{D}\zeta\zeta}$, $\Delta_{\dot{r}\dot{o}\dot{D}\dot{D}\zeta\zeta}$, $\Delta_{\dot{L}\dot{D}\zeta\zeta}$ – за рахунок шумів, квантування при аналого-цифровому перетворенні та обмеженої роздільної здатності ПЗЗ камери; $\Delta_{\dot{N}\dot{d}}$, $\Delta_{\dot{N}\dot{a}}$ – за рахунок неввірного розпізнавання частинок та дискретності їх підрахунку.

В результаті отримано рівняння перетворення для інформативного параметра, яким є концентрація частинок ПВС (C_{Zi})

$$C_{Zi} = \frac{N'_{Zi}(F_{XY\dot{D}\zeta\zeta})}{V_{\dot{\epsilon}}} = \frac{N'_{Zi}(F_{XY\dot{D}\zeta\zeta})}{l'_h \cdot l'_x \cdot l'_y \cdot (1 + \alpha_T \cdot (T - T_0))^3}, \quad (2)$$

де N'_{Zi} – кількість частинок ПВС у первинному вимірювальному перетворювачі; $V_{\dot{\epsilon}}$ – об'єм проточної вимірювальної кювети; l'_h , l'_x , l'_y – геометричні розміри вимірювальної

кювети; α_T – температурний коефіцієнт розширення матеріалу кювети; $T - T_0$ – зміна температури. При цьому $F_{XY\dot{D}\dot{C}\dot{C}}$ – цифрове зображення з ПЗЗ-камери, що визначається освітленістю елементів її матриці

$$F_{XY\dot{D}\dot{C}\dot{C}} = \tau_{i\dot{N}} \cdot \cos(\theta_2 - \theta_1) \cdot \frac{\int_{-\Delta\varphi_1/2}^{\Delta\varphi_1/2} \int_{-\Delta\theta_1/2}^{\Delta\theta_1/2} I'(\varphi, \theta) d\varphi d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} I'(\varphi, \theta) d\varphi d\theta} \cdot \frac{\int_{\Delta x(i-1)}^{\Delta x i} \int_{\Delta y(j-1)}^{\Delta y j} I'(x, y) dx dy}{\int_0^{x_{\max}} \int_0^{y_{\max}} I'(x, y) dx dy} \cdot \frac{\dot{O}_0 S_{u.\dot{O}}}{U_0} \cdot 2^n,$$

де $\tau_{i\dot{N}} = \tau_{i\dot{N}\dot{e}} \cdot \tau_{\dot{a}\dot{i}\dot{o}} \cdot 0,5\tau_{d1_0} \cdot \tau_{\dot{a}\dot{i}\dot{e}} \cdot (1 - r_e) \cdot \tau_{d2_0} \cdot \tau_{\dot{a}\dot{i}\dot{a}} \cdot (1 - r_{i\dot{a}}) \cdot \tau_{\dot{a}\dot{i}\dot{e}} \cdot (1 - r_{i\dot{e}})$ – коефіцієнт пропускання оптичної системи засобу контролю для лінійно поляризованого випромінювання в площині поляризації; $\tau_{i\dot{N}\dot{e}}$ – коефіцієнт пропускання оптичної системи монохроматора; $\tau_{\dot{a}\dot{i}\dot{o}}$ – коефіцієнт пропускання волоконно-оптичного хвилеводу; τ_{d1_0} , $\tau_{\dot{a}\dot{i}\dot{e}}$, τ_{d2_0} – коефіцієнти пропускання поляризатора, компенсатора та аналізатора для лінійно поляризованого випромінювання в площині поляризації; $\tau_{\dot{a}\dot{i}\dot{a}}$, $\tau_{\dot{a}\dot{i}\dot{e}}$ – коефіцієнти пропускання об'єктива та окуляра; r_e , $r_{i\dot{a}}$, $r_{i\dot{e}}$ – коефіцієнти відбивання від поверхні компенсатора, об'єктива та окуляра; $I'(\varphi, \theta)$ – індикатриса розсіювання оптичного вимірювального перетворювача з ПВС; $\Delta\varphi_1$, $\Delta\theta_1$ – кутові параметри сектора індикатриса, що потрапляє у оптичну систему засобу контролю; θ_2 , θ_1 – кутові положення поляризатора та аналізатора; $I'(x, y)$ – залежність інтенсивності випромінювання від координат елемента ПЗЗ-камери; i, j – порядковий номер елементів; Δx , Δy – геометричні розміри елементів; \dot{O}_0 – світловий потік джерела живлення; $S_{u.\dot{O}}$ – чутливість; U_0 – опорна напруга; n – розрядність перетворення.

Похибка визначення чисельної концентрації частинок ПВС δC_{zi} буде залежати від похибок визначення кількості частинок δN_{zi} та об'єму проточної вимірювальної кювети δV_e і обчислюється за методикою для опосередкованих вимірювань. В свою чергу, похибка δN_{zi} є методичною складовою загальної похибки та визначається похибками, які виникають за рахунок невірної розпізнавання типу частинок δN_d та дискретності їх підрахунку δN_a . Похибка δN_d визначається ймовірностями вірного розпізнавання частинок ПВС певної групи за їх спектрополяриметричними зображеннями. При цьому похибки, що виникають при формуванні спектрополяриметричних зображень у вимірювальному каналі засобу контролю в результаті впливають на точність розпізнавання типу частинок. Ймовірність визначення кількості частинок певної групи з помилкою не більше Δx

$$P_{\dot{A} \leq \Delta x} = \prod_{j=1}^N p_{\dot{a}i} + \sum_{m=1}^{\Delta x} \left(\frac{N!}{\Delta x! (N - \Delta x)!} \prod_{i=1}^{N - \Delta x} p_{\dot{a}i} \prod_{j=1}^{\Delta x} (1 - p_{\dot{a}i}) \right), \quad (3)$$

де N – кількість частинок, $p_{\dot{a}i}$ – ймовірність вірного розпізнавання частинок.

Інструментальна складова похибки вимірювань концентрації частинок ПВС виникає при встановленні об'єму вимірювальної кювети та є систематичною. Вона залежить від механічних похибок при виготовленні кювети та зміні її розмірів під впливом температури.

Оцінені значення інструментальної і методичної похибок складають відповідно 0,5% та 2%, а загальна похибка не більше 2,5 %.

Досліджено дію впливних факторів на перетворення інформативного сигналу у засобі контролю. Статична метрологічна характеристика засобу контролю та залежності зміни чутливості визначення концентрації наведені на рис. 5.

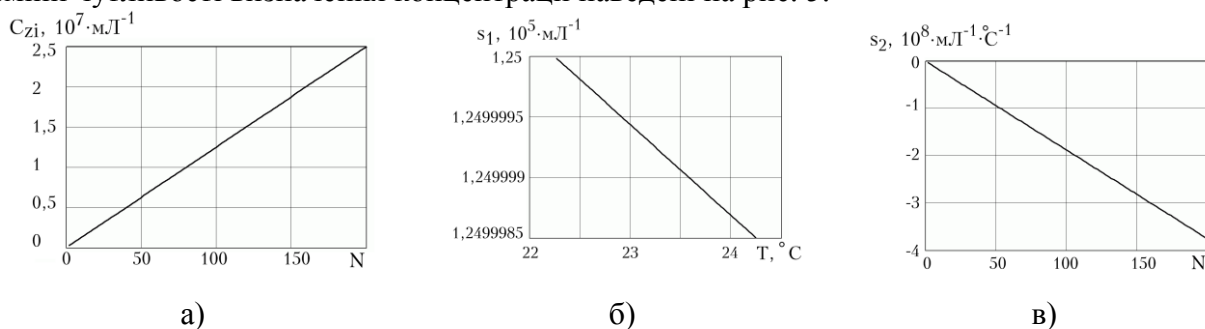


Рис. 5. Статична метрологічна характеристика засобу контролю (а) та залежності зміни чутливості $s_1 = \partial C_{zi} / \partial N_{zi}$ (б), $s_2 = \partial C_{zi} / \partial T$ (в)

У четвертому розділі проведено аналіз експериментальних результатів та оцінка вірогідності контролю концентрацій частинок ПВС. При цьому алгоритмічне і програмне забезпечення розробленого автоматизованого засобу контролю виконано під MATLAB R2008a, що дозволило використати спеціалізовані бібліотеки функцій для обробки зображень та роботи із зовнішніми пристроями підключеними до комп'ютера. Загальний алгоритм роботи засобу контролю такий. Встановлюється необхідна довжина хвилі зонduючого випромінювання та кути повороту елементів поляризаційної системи. Спектрополяриметричне

зображення отримується за допомогою ПЗЗ-камери та записується у файл. Після отримання масиву зображень на необхідних довжинах хвиль та кутах повороту поляризатора здійснюється комплексна обробка зображень та розпізнавання типів частинок, що реалізується за допомогою типового інструментарію MATLAB. Розпізнавання частинок при порівнянні зі зразковими зображеннями здійснюється за допомогою згортки у частотній області з використанням дискретного перетворення Фур'є. Порівняння масивів спектрополяриметричних зображень частинок здійснюється статистично оптимальним класифікатором Байєса на основі відстані Махаланобіса. Після розпізнавання приналежності частинок до різних груп визначаються їх концентрації.

Для підвищення швидкодії при заданому значенні вірогідності контролю доцільно зменшити кількість елементів у масиві спектрополяриметричних зображень частинок. Це здійснюється за рахунок визначення характеристичних довжин хвиль та кутів повороту поляризаційних елементів, які дозволяють з найбільшою точністю розпізнати частинки ПВС певного типу, що в результаті дає можливість з високою вірогідністю контролювати концентрацію цього типу частинок.

За допомогою розробленого засобу контролю досліджено стан водних об'єктів на основі контролю концентрацій частинок певних видів фітопланктону. Відбір проб з водного об'єкту здійснено за стандартною методикою з використанням батометра Руттнера. Дослідження зразків виконувалось *in vitro*, як в живому, так і фіксованому стані. На основі результатів досліджень виявленні сезонні зміни концентрацій частинок фітопланктону різних груп, що зумовлені різними факторами (рис. 6). Оцінку якості води на основі результатів біоіндикації по фітопланктону здійснено за допомогою індексу забруднення навколишнього середовища на основі методу Зелінки–Марвана

$$S_{EPI} = \sum_{i=1}^N s_i C_{zi} J_i / \sum_{i=1}^N C_{zi} J_i$$
, де N – число видів фітопланктону, що є біоіндикаторами; C_{zi} –

концентрації частинок фітопланктону i -того виду; s_i , J_i – сапробна валентність та індикаторна вага i -того виду взяті з довідникових таблиць для видів-біоіндикаторів.

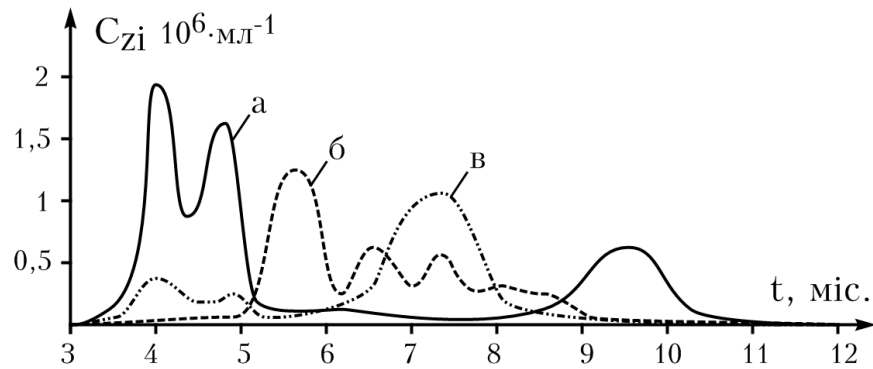


Рис. 6. Експериментальні результати сезонних змін концентрацій частинок фітопланктону різних груп: а – діатомові, б – зелені, в – синьо-зелені водорості

Методика оцінювання рівня токсичності за допомогою біондикації по фітопланктону полягає у визначенні відносної зміни концентрації частинок при дії токсичних речовин, що містяться у тестованій воді. У якості тест-об'єкта використовується культура водоростей *Scenedesmus quadricauda* (Turp) Breb. або *Chlorella vulgaris* Beijer. У колби з 100 мл контрольної та тестованої води додають по 0,5 мл підготовленої культури водоростей (початкова концентрація $25-50 \cdot 10^3 \text{ мл}^{-1}$), а також по 0,1 мл живильного сольового розчину мікроелементів та розміщують у люміностаг на заданий час. Далі розраховують відношення концентрації частинок у тестованому та контрольному зразках води, що характеризує рівень інтегральної токсичності.

Згідно міжнародних рекомендацій було оцінено невизначеності вимірювань концентрацій частинок ПВС за допомогою розробленого засобу контролю. З врахуванням впливу пробопідготовки за рахунок седиментації концентрація частинок ПВС у серії вимірювань може відрізнитись, а методична невизначеність, що вноситься пробопідготовкою врахована при опрацюванні експериментальних результатів по кількості частинок певного типу у вимірювальній кюветі. При концентрації частинок у ПВС $1,394 \cdot 10^7 \text{ мл}^{-1}$ отримано значення сумарної стандартної невизначеності $3,053 \cdot 10^5 \text{ мл}^{-1}$ та розширеної стандартної невизначеності $7,459 \cdot 10^5 \text{ мл}^{-1}$.

Проведено оцінювання вірогідності контролю концентрацій частинок ПВС. Гістограми розподілу ймовірностей значень концентрації частинок ПВС та похибки вимірювання наведено на рис. 7.

Значення концентрацій частинок і значення похибок вимірювання розподілені за нормальним законом (рис. 8). Підтвердження гіпотези, що значення концентрації частинок ПВС і похибки вимірювання дійсно розподілені за нормальним законом здійснено за допомогою критерію Пірсона χ^2 .

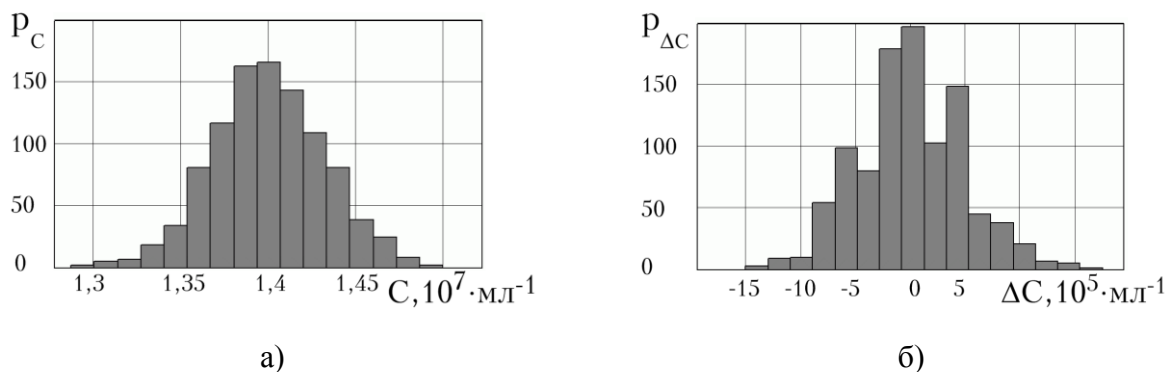


Рис. 7. Гістограми розподілу ймовірностей значень:
а) концентрації частинок ПВС, б) похибки вимірювання

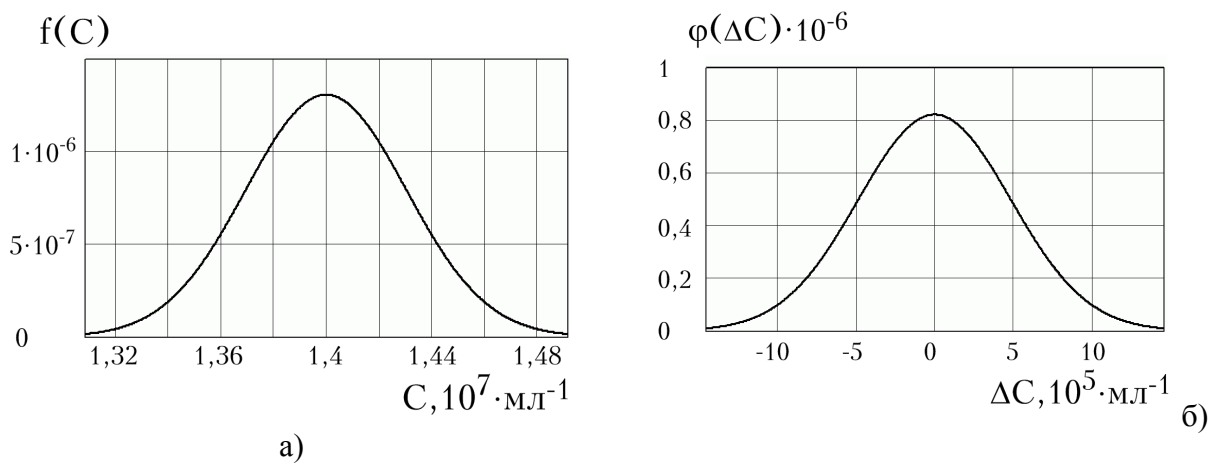


Рис. 8. Функції щільності розподілу ймовірності:
а) концентрації частинок ПВС, б) похибки вимірювання

Відповідно ДСТУ ГОСТ 27384: 2005 границі допуску концентрації частинок ПВС задамо в межах 15 % відхилення від нормованого значення. В залежності від призначення контролю концентрації частинок ПВС можливі різні випадки щодо встановлення границь допуску концентрації (рис. 9). Так, при контролі евтрофікації (“цвітіння”) водойм концентрація частинок ПВС не повинна перевищувати нормованого значення. При контролі токсичності поверхневих вод, концентрація частинок ПВС, які використовуються у якості тест-організму, не повинна бути меншою нормованого значення. У випадку контролю інтегрального рівня забруднення водних об’єктів – не повинна виходити за межі встановленого допускового інтервалу.

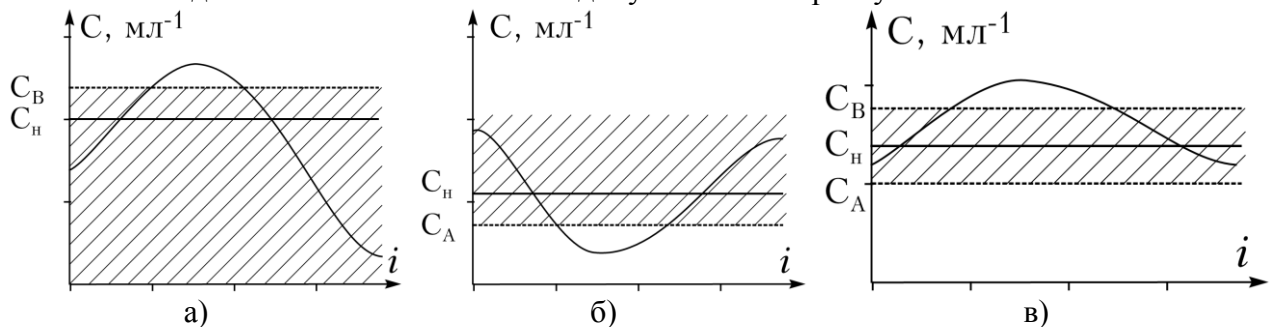


Рис. 9. Встановлення границь допуску при контролі концентрацій частинок ПВС: а) евтрофікації водойм; б) токсичності поверхневих вод; в) інтегрального рівня забруднення

У випадку контролю евтрофікації водойм та контролю токсичності поверхневих вод помилка 2-го роду складає не більше $\beta=0,008$, а значення помилки 1-го роду $\alpha=0,024$. Таким чином, інструментальна вірогідність контролю складатиме $D_i=0,968$. У результаті отримано значення помилки 1-го та 2-го роду не більше $\alpha=0,024$ та $\beta=0,016$ для контролю інтегрального рівня забруднення водних об’єктів. При цьому інструментальна вірогідність контролю складатиме $D_i=0,96$. Оскільки контролюється концентрація частинок ПВС лише одного типу, то немає надлишкових контрольованих параметрів чи неконтрольованих параметрів, які визначають стан об’єкту контролю, а тому методична достовірність дорівнює одиниці. Відповідно, з врахуванням методичної та інструментальної складових вірогідність контролю буде не менше $\check{A} = \check{A}_e \cdot \check{A}_l = 0,96$. Порівняння розробленого засобу контролю концентрацій частинок ПВС за спектрополяриметричним методом здійснено з традиційною методикою на основі візуальної мікроскопії (мікроскоп БЮЛАМ 70, збільшення $\times 400$) з використанням лічильної камери Горяєва та автоматизованою мікроскопією (мікроскоп MICROS 200T, збільшення $\times 400$) на основі порівняння геометричних параметрів частинок. Вірогідність контролю підвищена до 0,96 у порівнянні

зі значенням 0,9 для відомих аналогів. Крім того похибка вимірювання концентрацій частинок ПВС отримана не більше 2,5%, у порівнянні, наприклад, зі значенням 20% для автоматизованої мікроскопії на основі порівняння геометричних параметрів частинок.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

На основі досліджень, виконаних у дисертаційній роботі, розвинуті теоретичні, практичні та метрологічні основи засобів контролю концентрацій частинок ПВС, завдяки чому розв'язана задача підвищення вірогідності контролю концентрацій частинок ПВС за спектрополяриметричним методом.

Отже, основні наукові результати роботи полягають у наступному.

1. В результаті здійсненого аналізу сучасних методів і засобів контролю концентрацій частинок ПВС виявлена необхідність в подальшому розвитку оптичних методів і засобів їх контролю. Зокрема, найбільш перспективними для визначення концентрації частинок ПВС певного типу є методи спектрополяриметрії та мікроскопії, які потребують подальшого вдосконалення відповідно до особливостей об'єкту контролю.

2. Вдосконалено математичні моделі перенесення поляризованого випромінювання об'єктом контролю та первинним вимірювальним перетворювачем з врахуванням форми і внутрішньої структури частинок, їх спектральних і поляризаційних властивостей, що дозволило підвищити достовірність розпізнавання типу частинок ПВС.

3. Запропоновано спектрополяриметричний метод контролю концентрацій частинок ПВС, який полягає у порівнянні з допомогою розробленого автоматизованого засобу контролю масивів спектрополяриметричних зображень частинок, отриманих *in vitro* ПЗЗ-камерою в заданому діапазоні зміни довжин хвиль та кутових положень поляризатора і аналізатора, що дає можливість підвищити вірогідність контролю концентрацій частинок ПВС.

4. Розроблено структурну схему засобу контролю концентрацій частинок ПВС за спектрополяриметричним методом та вдосконалено конструкцію оптичного первинного вимірювального перетворювача. Проаналізовано рівняння перетворення інформативного сигналу у вимірювальному каналі засобу контролю, що дало можливість врахувати фактори впливу на перетворення інформативного сигналу, а також зменшити методичну складову похибки вимірювань та підвищити вірогідність контролю.

5. Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення засобу контролю концентрацій частинок ПВС для обробки спектрополяриметричних зображень частинок, оптимізації кількості зображень, розпізнавання частинок ПВС певного типу та визначення їх концентрацій з використанням спеціалізованих бібліотек функцій для обробки зображень MATLAB.

6. Дістало подальшого розвитку обґрунтування вибору із встановленого діапазону мінімальної кількості значень характеристичних довжин хвиль пігментів та кутових положень поляризатора і аналізатора, що дозволяє зменшити масив спектрополяриметричних зображень частинок та підвищити швидкодію при заданому значенні вірогідності контролю.

7. Удосконалено методику та проведено експериментальні дослідження для здійснення контролю забруднення водних об'єктів, у яких концентрації частинок фітопланктону було визначено за допомогою розробленого засобу контролю. Частинки фітопланктону певних видів використано у якості тест-об'єктів при контролі евтрофікації водойм, токсичності поверхневих вод та інтегрального рівня забруднення водних об'єктів з відповідним встановленням границь допуску концентрацій частинок ПВС.

8. Проаналізовано експериментальні результати вимірювання концентрацій частинок ПВС за допомогою розробленого засобу, що підтвердило адекватність запропонованої математичної моделі. При цьому вдосконалено математичну модель оцінювання невизначеності вимірювань концентрацій частинок ПВС та отримано значення сумарної стандартної невизначеності $3,053 \cdot 10^5$ мл⁻¹ і розширеної стандартної невизначеності

$7,459 \cdot 10^5$ мл⁻¹ при концентрації частинок $1,394 \cdot 10^7$ мл⁻¹. Визначено похибки вимірювань та оцінено вірогідність контролю концентрацій частинок ПВС на основі помилок першого та другого роду. В результаті отримано значення $\alpha=0,024$, $\beta=0,016$, а вірогідність контролю не менше $D=0,96$, що суттєво перевищує аналогічні значення, отримані відомими методами та відповідними засобами контролю.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кватернюк С. М. Оптична контрольньо-вимірювальна система для екологічного моніторингу водних об'єктів / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – №4. – С. 204–208.
2. Кватернюк С. М. Автоматизований контроль домішок у водно-дисперсних середовищах / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2005. – №2. – С. 164–172.
3. Кватернюк С. М. Розробка системи контролю світлорозсіювальних характеристик водних середовищ / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – №5. – С. 22–29.
4. Кватернюк С. М. Неінвазійний спектрополяриметр зображень для дослідження біотканин та гуморальних середовищ / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 5. – С. 15–19.
5. Кватернюк С. М. Моделювання методом Монте-Карло спектрополяризаційних зображень оптично м'яких частинок полідисперсних біологічних середовищ / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, А. П. Іванов [та ін.] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – №2. – С. 79–86.
6. Кватернюк С. М. Спектрополяриметричні методи та засоби дослідження параметрів гуморальних середовищ / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський [та ін.] // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – №1. – С. 128–131.
7. Кватернюк С. М. Математичне моделювання індикатрис розсіювання частинок полідисперсних водних середовищ / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №2. – С. 9–13.
8. Кватернюк С. М. Контроль стану водних об'єктів як полідисперсних середовищ на основі методу спектрополяриметричних зображень / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк [та ін.] // Екологія та промисловість. – 2010. – №2. – С. 77–81.
9. Кватернюк С. М. Метод та прилад контролю стану полідисперсних водних середовищ за спектрополяриметричними зображеннями частинок / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк [та ін.] // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Серія: Технічні науки. – 2010. – №1. – С. 119–124.
10. Кватернюк С. М. Дослідження оптичних характеристик водно-дисперсних систем / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк [та ін.] // Оптикоелектронні інформаційні технології “Фотоніка-ОДС 2005”: III міжнар. наук.-техн. конф., 27–28 квітня 2005 р.: тези допов. – Вінниця, 2005. – С. 216–217.
11. Кватернюк С. М. Спектрофотометричний контроль дисперсності домішок у неоднорідних водних середовищах / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2005): VIII міжнар. наук.-техн. конф., 24–28 жовтня 2005 р.: тези допов. – Вінниця, 2005. – С. 55.
12. Кватернюк С. М. Автоматизована система контролю світлорозсіювальних характеристик водних середовищ / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк [та ін.] // I-й Всеукраїнський з'їзд екологів: міжнар. наук.-техн. конф., 4–7 жовтня 2006 р.: тези допов. – Вінниця, 2006. – С. 180.
13. Кватернюк С. М. Математичне моделювання поляризації випромінювання у світлорозсіювальних середовищах / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк

[та ін.]. // XIII міжнародна конференція з автоматичного управління, 25-28 вересня 2006 р.: матеріали конф. – Вінниця, 2006. – С. 152–157.

14. Кватернюк С. М. Інтелектуалізована комп'ютерна система автоматизованого контролю оптичних параметрів водно-дисперсних середовищ / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк [та ін.]. // ІНТЕРНЕТ-ОСВІТА-НАУКА-2006: п'ята міжнар. конф., 10-14 жовтня 2006 р.: матеріали конф. – Том 2. – Вінниця, 2006. – С. 628–630.

15. Кватернюк С. М. Дослідження інтерактивного поляризаційного спектроекстинкциметра / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, В. І. Солоненко [та ін.]. // Применение лазеров в медицине и биологии: XXII міжнар. наук.-практ. конф., 21–24 жовтня 2007 р.: тези допов. – Ялта, 2007. – С. 134–135.

16. Кватернюк С. М. Розробка інтерактивних оптичних засобів для поляризаційної діагностики біотканин та гуморальних середовищ / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, Г. О. Черноволик [та ін.] // Применение лазеров в медицине и биологии: XXII міжнар. наук.-практ. конф., 21–24 жовтня 2007 р.: тези допов. – Ялта, 2007. – С. 135–136.

17. Патент України №35499, МПК (2006) G01N 21/21 Спектрополяриметр зображення для діагностики матеріалів біомедичного походження / Петрук В. Г., Кватернюк С. М., Іванов А.П., Барун В. В.; власник Вінницький національний технічний університет. – №u200804100 ; заявка 1.04.08 ; опубл. 25.09.08, Бюл. №18.

18. Патент Республики Беларусь №5299, МПК (2006) G01N 21/21 Спектральный поляриметр изображения для диагностики сред биомедицинского происхождения / Петрук В.Г., Кватернюк С.М., Иванов А.П., Барун В.В.; заявитель и патентообладатель Государственное научное учреждение Институт физики им. Степанова НАН Беларуси. – №u20080575 ; заявка 17.07.08 ; опубл. 30.06.09, Бюл. №10.

19. Кватернюк С. М. Спектральные особенности распространения света в морской воде с сильно поглощающими водорослями / В. В. Барун, С. М. Кватернюк, А. П. Иванов [и др.] // Проблемы оптической физики и биофотоники: 12-тая Международная молодежная научная школа по оптике, лазерной физике и биофотонике., 23–26 сентября 2006 г.: материалы конф. – Саратов, 2009. – С. 78–85.

20. Кватернюк С. М. Засоби автоматизованого контролю оптично м'яких частинок гуморальних середовищ на основі методу спектрофотометрії зображень / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, І. В. Васильківський [та ін.] // II-ий Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю: міжнар. наук.-техн. конф., 23–26 вересня 2009 р.: матеріали конф. – Вінниця, 2009. – С. 341–344.

21. Кватернюк С. М. Контроль стану водних об'єктів методом Зелінки-Марвана з використанням спектрополяриметричних зображень частинок фітопланктону / О. О. Цвенько, С. М. Кватернюк, Я. В. Мороз [та ін.] // Географія, геоекологія, геологія: досвід наукових досліджень: VII міжнар. наук. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених, 11-14 травня 2010 р.: матеріали конф. – Дніпропетровськ, 2010. – С. 142–143.

АНОТАЦІЯ

Кватернюк С. М. Спектрополяриметричний метод та автоматизований засіб контролю концентрацій частинок полідисперсних водних середовищ. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця. – 2010.

Дисертацію присвячено підвищенню вірогідності контролю концентрацій частинок полідисперсних водних середовищ (ПВС) на основі розробленого спектрополяриметричного методу та відповідного автоматизованого засобу контролю. У роботі проаналізовані існуючі методи та засоби контролю концентрацій частинок ПВС, виявлено їх недоліки, а також необхідність розробки і вдосконалення оптичних методів. Розвинуто математичні моделі перенесення поляризованого випромінювання об'єктом контролю, що дозволило врахувати особливості форми і внутрішньої структури частинок

ПВС, їх спектральні та поляризаційні властивості. Запропоновано спектрополяриметричний метод контролю концентрацій частинок ПВС, що дозволяє більш достовірно розпізнавати частинки певного типу та визначати їх концентрацію, а це, у порівнянні з відомими методами, дає можливість підвищити вірогідність контролю концентрацій частинок ПВС. Розроблено автоматизований засіб контролю на основі спектрополяриметричного методу, проаналізовано його похибки та метрологічні характеристики, оцінено невизначеність результату вимірювання. На основі результатів експериментальних досліджень визначено вірогідність контролю концентрацій частинок ПВС за допомогою розробленого засобу контролю.

Ключові слова: *засіб контролю, спектрополяриметрия, концентрація частинок, полідисперсні водні середовища, невизначеність вимірювання, вірогідність контролю.*

АННОТАЦІЯ

Кватернюк С. М. Спектрополяриметрический метод и автоматизированное средство контроля концентраций частиц полидисперсных водных сред. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Винницкий национальный технический университет, Винница. – 2010.

Диссертация посвящена повышению достоверности контроля концентраций частиц полидисперсных водных сред (ПВС) на основе разработанных спектрополяриметрического метода и соответствующего автоматизированного средства контроля. В работе проанализированы существующие методы и средства контроля концентраций частиц ПВС, выявлены их недостатки, а также необходимость разработки и совершенствования оптических методов. В частности, наиболее перспективными для определения концентрации частиц ПВС определенного типа признаны методы спектрополяриметрии и микроскопии, которые требуют дальнейшего развития в соответствии особенностям объекта контроля.

Индикатрисы рассеивания частиц ПВС разной формы и структуры моделировались с использованием теории Ми, приближения Рэлея-Ганса-Дебая и геометрической оптики. Показано, что частицы ПВС определенного типа характеризуются соответствующей индикатрисой рассеивания, позволяющей распознать тип частицы. На базе метода Монте-Карло и гибридной аппроксимации усовершенствованы математические модели переноса поляризованного излучения объектом контроля и первичным измерительным преобразователем, что позволило учесть особенности формы и внутренней структуры частиц ПВС, их спектральные и поляризационные свойства, и, в результате, более точно распознать тип частиц и определить их концентрацию.

Предложен спектрополяриметрический метод контроля концентраций частиц ПВС, который заключается в сравнении с помощью разработанного автоматизированного средства контроля массивов спектрополяриметрических изображений частиц, полученных *in vitro* ПЗС-камерой на характеристических длинах волн пигментов при установленных углах поворота поляризатора и анализатора, что позволяет более достоверно распознавать частицы определенного типа и определять их концентрацию, а это, в сравнении с известными методами, дает возможность повысить достоверность контроля концентраций частиц ПВС.

Разработана структурная схема средства контроля концентраций частиц ПВС спектрополяриметрическим методом и усовершенствовано конструкцию оптического первичного измерительного преобразователя. Проанализировано преобразование измерительного сигнала в измерительном канале средства контроля, что позволило учесть влияющие факторы, а также уменьшить методическую составляющую погрешности измерений и повысить достоверность контроля.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированного средства контроля концентраций частиц ПВС для обработки спектрополяриметрических изображений частиц, оптимизации количества изображений, распознаваний частиц

определенного типа и определения их концентраций с использованием специализированных библиотек функций MATLAB.

Усовершенствована методика и проведены экспериментальные исследования для осуществления контроля загрязнения водных объектов, в которых концентрации частиц фитопланктона были определены с помощью разработанного средства контроля. Частицы фитопланктона определенных видов использовано в качестве тест-объектов при контроле эвтрофикации водоемов, токсичности поверхностных вод, а также интегрального уровня загрязнения водных объектов с соответствующей установкой границ допуска концентраций частиц ПВС.

Усовершенствована математическая модель оценивания неопределенности измерения концентраций частиц ПВС, что позволило учесть пробоподготовку и другие факторы влияющие на преобразование информативного сигнала в средстве контроля, а также повысить достоверность контроля концентраций частиц ПВС за счет уменьшения методической неопределенности измерения. Определены погрешности измерений и оценена достоверность контроля концентраций частиц ПВС на основе ошибок первого и второго рода. При этом проанализированы экспериментальные результаты измерения концентраций частиц ПВС с помощью разработанного средства контроля, что подтвердило адекватность предложенной математической модели. Расчеты показали, что предложенный спектрополяриметрический метод контроля концентраций частиц ПВС и разработанное автоматизированное средство позволили повысить достоверность контроля по сравнению с известными аналогами.

Ключевые слова: *средство контроля, спектрополяриметрия, концентрация частиц, полидисперсные водные среды, неопределенность измерения, достоверность контроля.*

ABSTRACT

Kvaternyuk S. M. Spectropolarimetric method and automated means of particles concentrations control for polydisperse water environments. – A manuscript.

Thesis for obtaining the PhD degree on the speciality 05.11.13 – Devices and methods of the control and definition of structure of substances. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. – 2010.

The thesis is dedicated to improving the veracity of particles concentrations control for polydisperse water environment (PWE) on the basis of the developed spectro-polarimetric method and the corresponding automated means of control. We have analyzed existing methods and means of particles concentrations control for PWE, their shortcomings and necessity of development and improvement optical methods are revealed. The mathematical model of the polarized radiation transfer by object of control is improved, allowing to take into account the shape and internal structure of PWE particles and their spectral and polarization properties. The proposed spectro-polarimetric method of particles concentrations control for PWE allow to detect particles of a certain type with more veracity and to determine their concentration. In comparison with known methods, it makes possible to increase the veracity of particles concentrations control for PWE. The automated means of control based on spectropolarimetric method is developed, it's errors and metrological characteristics are analyzed, uncertainty of the measurement results is estimated. The veracity of particles concentrations control for PWE on the basis of results of experimental studies with the developed means of control is defined.

Keywords: *means of control, spectropolarimetry, concentration of particles, polydisperse water environment, uncertainty of measurement, veracity of the control.*

Підписано до друку 6.09.2010 р. Формат 29.7×42 ¹/₄
Наклад 100 прим. Зам. № 2010-152
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59