

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

УДК681.7.013

РОЗРОБКА ТЕЛЕВІЗІЙНОЇ ОПТИКО-ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КАПІЛЯРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗПЛАВІВ

© Муравський Л.І., Кулинич Я.П., Максименко О.П., Вороняк Т.І., 2001
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

Розглянуто телевізійну оптико-цифрову систему для дослідження капілярних характеристик розплавів за методом лежачої краплі. Проаналізовано особливості розрахунку оптичної схеми системи, побудови пристрою вводу відеосигналу та розробки програмного забезпечення. Наведено результати вимірювань капілярної сталості розплаву германію.

Оптичні системи вимірювання координат точок профілю зображення краплі займають провідну роль при дослідженні капілярних характеристик [1]. Для вимірювання поверхневого натягу і кута змочування високотемпературних розплавів застосовують метод лежачої краплі, який включає вимірювання геометричних розмірів краплі за її зображенням, а саме - діаметра екватора d , висоти від екватора до полюса h , контактного кута θ , розмірів підкладки l та обчислення за цими даними капілярних характеристик, зокрема, капілярної сталості a^2 ($a^2 = \sigma / (\Delta \rho g z)$, де σ - поверхневий натяг на межі контакту розплавів із навколишнім повітрям, $\Delta \rho$ - різниця густин розплаву і повітря, g - прискорення земного тяжіння) [2-6].

Для реалізації методу лежачої краплі використовують фотографічні, телевізійні або телевізійні оптико-цифрові системи (ТОЦС). Фотографічна реєстрація зображень з наступним вимірюванням геометричних розмірів крапель на зображенні є довготривалим процесом і вимагає виконання великої кількості операцій, частину з яких автоматизувати складно або практично неможливо. Вказані обставини не дозволяють використовувати фотографічні методи для визначення капілярних характеристик високотемпературних розплавів при динамічній зміні температури і тиску оточуючого краплю середовища в спеціально виготовленій термокамері.

Викладене вимагає розробки для вимірювання капілярних характеристик матеріалів спеціалізованих телевізійних систем, у яких висока точність вимірювання геометричних параметрів краплі поєднується з швидкістю реєстрації і обробки

зображень [4,6-11]. При цьому найбільш перспективними вважаються ТОЦС, що включають ПЗЗ відеокамеру (відеокамеру на приладі з зарядовим зв'язком) з відповідним інтерфейсом, які реєструють зображення розмірністю від 512 x 512 x 8 біт і більше за час, що не перевищує тривалість стандартного телевізійного кадру.

В ряді робіт представлені результати вимірювань капілярних характеристик речовин за допомогою оптико-цифрових систем з реєстрацією зображень ПЗЗ камерою [4,10,11]. Однак у вказаних роботах не розглядаються проблеми вибору оптимальних алгоритмів функціонування усієї системи в цілому, а також відсутній системний підхід до всього комплексу операцій формування зображення краплі в оптичній частині системи, його перетворення у телевізійний сигнал, захоплення і перетворення телевізійного кадру у цифровий код з подальшою обробкою зображення та обчисленням капілярних характеристик досліджуваної речовини. Спроби часткового вирішення вказаних задач розглянуті в роботах [8,12-14] за нашою участю.

Зображення лежачих крапель високотемпературних розплавів мають ряд специфічних особливостей, що пов'язані з наявністю власного випромінювання та перевідбиванням краплею світла від нагрівачів і стінок термокамери. Тому такого роду зображення мають низький контраст і значні регулярні завади у вигляді блімів, а їх цифрова обробка традиційними методами є неефективною. У зв'язку з цим, для обробки зображень необхідно використовувати нові підходи і розробляти нові алгоритми, які б враховували специфічні особливості таких слабкоконтрастних і зашумлених зображень.

В даній статті розглянуто основні принципи

побудови ТОЦС для моніторингу капілярних характеристик високотемпературних розплавів, проаналізовано особливості синтезу оптичної схеми ТОЦС і електронного пристрою вводу зображення у персональний комп'ютер (ПК), розглянуто розроблене спеціалізоване програмне забезпечення для вимірювання капілярних характеристик високотемпературних розплавів і наведені результати вимірювань капілярної сталої розплаву германію.

Елементи оптичної схеми ТОЦС.

Специфіка побудови оптичної схеми ТОЦС пов'язана з устаткуванням, де формуються відповідні умови для об'єкта досліджень. У випадку високотемпературних розплавів, які вивчаються в спеціальних установках, є деякі особливості при виборі оптичної схеми. Зокрема, авторами для формування зображення лежачої краплі використовувалась оптична схема, що наведена на рис. 1. Ця оптична схема дозволяє отримати якісне тіньове зображення краплі розплаву. Вибираючи елементи оптичної схеми, автори керувались наступними міркуваннями.

Для зменшення похибок вимірювання за допомогою ТОЦС оптична схема системи повинна забезпечувати лінійне збільшення v , що визначається найбільшим розміром об'єкта дослідження u (в нашому випадку екватором краплі) і можливим його відхиленням під час вимірювання, що

враховувалось за допомогою коефіцієнта $k=0.1...0.2$ (за експериментальними даними), та розміром ПЗЗ матриці Y . Тоді

$$\beta = \frac{Y}{u} \cdot (1 - k). \quad (1)$$

Розраховане за виразом (1) β повинно узгоджуватись з дистанцією знімання D . Шляхом нескладних перетворень можна показати, що в нашій оптичній схемі вона визначається наступним чином [13]:

$$D = 2f + f \cdot \beta + f / \beta = f(2 + \beta + 1/\beta), \quad (2)$$

де f - фокусна відстань проектувального об'єктива.

Найменша дистанція знімання в ТОЦС обмежена габаритними розмірами термокамери, в якій формується розжарена крапля, та розмірами проектувального об'єктива. Вираз (2) є наближений і не враховує відстані між головними площинами проектувального об'єктива. Тому дійсна дистанція знімання буде відрізнятися від розрахованої за цим виразом на 1...2 %, що враховувалось нами під час юстування оптичної схеми.

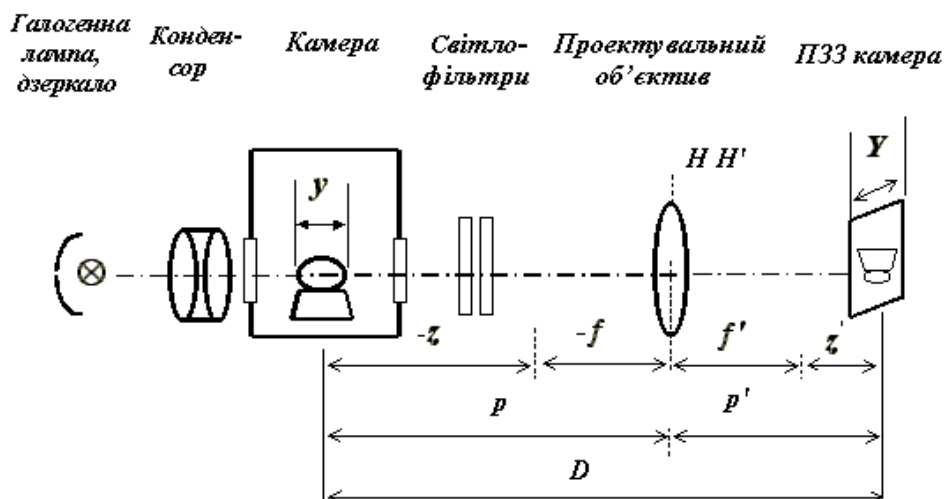


Рис. 1. Оптична схема ТОЦС.

Дистанцію знімання D в ТОЦС доцільно робити мінімальною, що забезпечує жорсткість конструкції і зменшує габарити системи. Оскільки від величини дистанції знімання залежить глибина різкості оптичної системи, то для вибраного проекту-

вального об'єктива необхідно розрахувати глибину різкості як у просторі предметів, так і у просторі зображень. Такий розрахунок дозволить знайти оптимальну діафрагму об'єктива та оцінити допустимі механічні переміщення під час вимірювань, що

викликані нестабільністю положення як краплі, так і оптичної системи. Відомо, що при зменшенні величини діафрагми зростає глибина різкості оптичної системи, але падає роздільна здатність. Тому слід шукати компромісне значення величини діафрагми [15].

Оцінку глибини різкості в просторі предметів Δ (зображень Δ') можна отримати через розміри найменших деталей предмета δ_1 (зображення δ'_1), використовуючи такі вирази [13]:

$$\Delta = 2\delta_1(1 + 1/\beta)K, \quad (3)$$

$$\Delta' = \delta'_1 \cdot (1 + \beta)K, \quad (4)$$

де K - відносний отвір об'єктива.

Зауважимо, що у виразі (4) δ'_1 в нашому випадку визначається величиною, оберненою до просторової роздільної здатності ПЗЗ матриці.

Під час вибору K для проектувального об'єктива слід уникати випадків, коли діаметр діафрагми буде меншим за максимальні розміри об'єкта досліджень. Можна показати, що в цьому випадку, наприклад, для кулі, яка часто використовується у подібних системах для калібрування, об'єктив формує зображення не дійсного діаметра кулі d_0 , а діаметра d_1 (див. рис. 2). При цьому дійсний діаметр кулі d_0 і діаметр d_1 пов'язані такою залежністю:

$$d_1 = d_0 \cos \left[\arctg \left(\frac{d_0 - \frac{f}{K}}{f(1 + \beta)} \right) \right]. \quad (5)$$

Використовуючи вираз (5), проводили розрахунок оптимальної діафрагми проектувального об'єктива, що використовувався у ТОЦС.

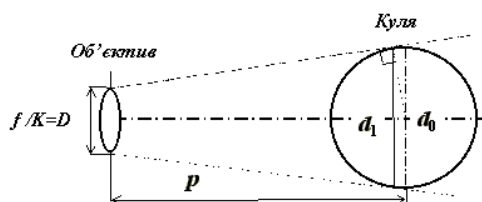


Рис. 2. Формування зображення кулі.

Для забезпечення якісного контрастного зображення розжареної краплі на рівномірному фоні в ТОЦС застосовано освітлювач, що складався з галогенної лампи потужністю 200 Вт і напругою

живлення 24 В та дзеркально-лінзового конденсора. Нейтральні світлофільтри з коефіцієнтами послаблення 100 і 200 застосовані нами в оптичній схемі для придушення самосвічення краплі. Юстування оптичної схеми ТОЦС здійснювалось у два етапи: спочатку грубо, використовуючи тестову кулю, отримували рівномірне за фоном і контрастне зображення кулі; потім здійснювали точне юстування оптичної схеми, використовуючи краї зображення циліндричної підкладки, на якій формується крапля розплаву.

Основним елементом електронного каналу ТОЦС є відеокамера. Номенклатура і робочі характеристики сучасних ПЗЗ відеокамер, які використовуються при розробці оптико-цифрових систем, досить різноманітні. Вони мають майже ідеальну лінійну світлочутливу характеристику, великий динамічний діапазон до 10^7 , високу чутливість від 0,01 Лк, працюють у широкому діапазоні хвиль від ультрафіолетового до далекого інфрачервоного діапазону, мають жорстко фіксоване розміщення світлочутливих елементів розмірами від 6×6 мкм до 12×12 мкм і містять до 4096×4096 елементів на одну матрицю [16-18]. Тому вибір відеокамери сьогодні визначається виходячи з співвідношення вартість/точність.

При розробці ТОЦС для визначення капілярних характеристик високотемпературних розплавів використана відеокамера MTV-1802CB фірми "MINTRON", яка має 795×596 елементів розмірами 8×8 мкм і відношення сигнал/шум 48 дБ. Враховуючи, що ця відеокамера, як і більшість дешевих, не має цифрового інтерфейсу для безпосереднього підключення до ПК, а також те, що ТОЦС повинна програмно керуватись і працювати в реальному часі, виникла потреба розробки спеціалізованого програмно-керованого пристрою вводу відеозображення (ПВВ) у ПК.

Блок-схема розробленого ПВВ представлена на рис. 3, де П - підсилювач; ВП - блок відновлення постійної складової; ВСС - блок селекції; АЦП - аналого-цифровий перетворювач; М1, М2, М3 - мультиплексори; СГ - синхрогенератор; ПК - персональний комп'ютер; СА - селектор адреса; СК - селектор команд; СС - блок синхронізації; ЛА - лічильник адреса; ОЗП - оперативний запам'ятовуючий пристрій; ПД - порт даних; СН - стабілізатор напруги; ОН - джерело опорної напруги.

Розглянемо і проаналізуємо роботу пристрою.

Повний телевізійний сигнал, що поступає з відеокамери, одночасно подається на входи П, ВП і ВСС. У підсилювачі відбувається інвертування сигналу, підсилення і сумування його з постійною складовою, яка формується ВП. Перетворений таким чином відеосигнал поступає на вхід 8-

контуру краплі і автоматизованого обчислення таких його геометричних параметрів, як радіус екватора краплі, висота від екватора до полюса і контактний кут.

Незважаючи на велику кількість високопродуктивних алгоритмів і програм виділення контуру зображень, універсальні алгоритми формування контурів відсутні. В зв'язку з цим, формування контуру краплі слід вважати специфічною задачею, вирішення якої вимагає розробки оригінальних алгоритмів і відповідного програмного забезпечення.

На даний час запропоновано ряд підходів до виділення локальних об'єктів, які можна розділити на дві великі групи: пороговий метод і метод масок [19,20]. Внаслідок високої швидкості і простоти технічної реалізації широкого застосування набув метод порогового розділення. Але цей метод у випадку розжареної краплі за рахунок неоднорідності фону приводить до відносно великих похибок виявлення контуру краплі.

Цього недоліку позбавлені методи масок. Ці методи ґрунтуються на підсиленні перепаду

інтенсивностей за допомогою масок, сформованих так званими просторовими диференціальними операторами [21]. Аналіз літературних даних з метою оцінки різного типу операторів та проведені експерименти показали, що в групі диференціальних операторів найбільш придатним для наших цілей є оператор Собеля з масками розміром 3×3 .

Враховуючи викладене, на першому етапі обробки зображень краплі запропоновано провести його згладжування. Після чого провести підсилення перепаду інтенсивностей за допомогою операторів Собеля [21].

Програмне забезпечення, необхідне для функціонування автоматизованої ТОЦС, складається з загального програмного забезпечення (відеокарти, драйвери монітора і т.п.), яке постачається в комплекті з ПЕОМ і спеціального програмного забезпечення - сукупності програм розроблених при створенні автоматизованої системи.



Рис. 4. Структура спеціального програмного забезпечення ТОЦС.

Спеціальне програмне забезпечення виконано з використанням мови програмування Delphi 4.0. Пакет програм, структура якого приведена на рис. 4, призначений для вводу, відтворення і обробки зображення краплі та обчислення її капілярної сталості і контактного кута.

Етапи обробки зображення краплі, отриманого в реальних умовах, приведені на рис. 5, де *а*) вхідне зображення; *б*) зображення, отримане після процедури згладжування; *в*) контур краплі, отриманий методом Собеля; *г*) бінарне зображення краплі на якому показано визначені висота (вертикальна лінія) і екватор (широка смужка) краплі розплаву.

Розроблена ТОЦС була використана при проведенні експериментальних досліджень

капілярних властивостей розплаву германію, зокрема, для вимірювання капілярної сталості і контактного кута. Дослідження проводились на базі експериментального обладнання, наявного в інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

Для апробації розробленої ТОЦС та запропонованої програми спочатку були проведені вимірювання радіуса тестової кулі за її зображенням, при цьому була знайдена оцінка похибки вимірювання радіуса кулі у горизонтальному 0.2 % і вертикальному 0.4 % напрямках. Після чого проводились вимірювання геометричних розмірів крапель розплаву германію.

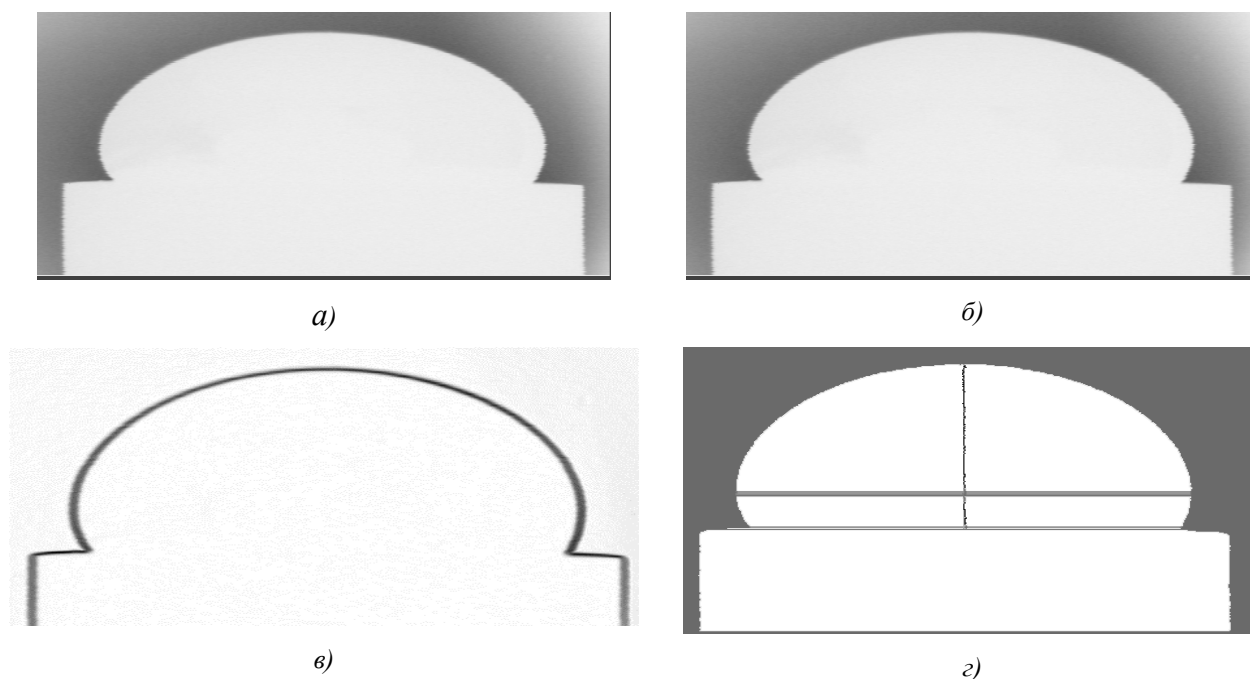


Рис. 5. Етапи обробки зображень краплі розплаву.

Крапля розплаву германію формувалась у вакуумній термокамері на циліндричній підкладці з графіту. Діаметр підкладки становив $10.51 \text{ мм} \pm 0.01 \text{ мм}$ і використовувався для розрахунку масштабного коефіцієнта передавального тракту. Температура розплаву контролювалась за допомогою термопари і під час проведення вимірювань змінювалась в межах $980 \dots 1000^\circ \text{C}$.

Результати статистичної обробки серії з N послідовних вимірювань ($N=37$) геометричних розмірів краплі і розрахованої капілярної сталості розплаву германію наведені в табл. 1, де $d_{0.9}$ - довірчий інтервал розрахованих середніх значень шуканих величин \bar{x} , так, що $(\bar{x} \pm d)$, h - висота

полноса і r - радіус екватора краплі, a^2 - капілярна стала, θ - контактний кут, S - стандартне відхилення.

Порівняння результатів вимірювання капілярної сталості розплаву германію, які отримані за допомогою розробленої ТОЦС, з літературними даними показали, що розроблена система забезпечує високоточні вимірювання капілярних характеристик високотемпературних розплавів.

Таким чином, на основі запропонованих методик і алгоритмів створена ТОЦС, яка включає оптичний канал, спеціальний ПВВ і адаптовані алгоритми обробки зображень краплі.

Таблиця 1 – Результати статистичної обробки зображень крапель германію.

Параметри	$h, \text{см}$	$r, \text{см}$	$a^2, \text{см}^2$	$\theta, \text{гр}$
Середнє	0.3375	0.4563	0.1015	118.97
Максимальне	0.3495	0.4582	0.1184	121.36
Мінімальне	0.3237	0.4531	0.0852	116.39
S	0.0053	0.001	0.0069	0.85
$d_{0,9}$	0.0014	0.0003	0.0018	0.23

Проведені дослідження на створеній ТОЦС показали, що основними складовими сумарної похибки при визначенні капілярної сталості є похибки визначення масштабу і похибки, які викликані обмеженою просторовою дискретизацією зображення ПЗЗ матрицею. Тестування розробленої ТОЦС засвідчили, що експериментальна похибка визначення капілярної сталості становить 1.8 %.

1. Горелов В.О., Кісіль І. С. Вибір методу для вимірювання динамічного поверхневого натягу // *Методи та прилади контролю якості.*-2000.-№5.- С.92-99. 2. Іващенко Ю.М., Єременко В.Н. Основи прецизійного вимірювання поверхневої енергії розплавів за методом лежачої краплі. –К.: Наук. думка, 1972. - 231 с. 3. Поверхностные свойства расплавов и твердых тел и их использование в материаловедении / Под ред. Ю.В. Найдича. – К.: Наук. думка, 1991.- 280 с. 4. Automation of axisymmetric drop shape analysis for measurements of interfacial tensions and contact angles / P. Cheng, D. Li, L. Boruvka et al. // *Colloids and Surfaces.* - 1990. - 43. - P. 151-167. 5. Pallas N.R., Harrison J. An automated drop shape apparatus and the surface tension of pure water // *Ibid.* - 1990. - 43. - P. 169-194. 6. Maze G., Burnet G. A non-linear regression method for calculating surface tension and contact angle from the shape of a sessile drop // *Surface Sci.* -1969. - 13. - P. 451-470. 8. Naidich Y.V., Grigorenko N.F. Capillary characteristics of high temperature melts measured by sessile-drop method using computer-aided TV system // *J. Mater. Sci.* - 1992. - 27. - P. 3092-3097. 9. Optical/digital system for measurements and diagnostics of surface properties of materials for micro- and optoelectronics / R.S. Bachevsky, V.A. Dostojny, L.I. Muravsky et al. // *Proc. SPIE.* - 2113. - P. 226-231. 10. Evaluation of errors in automatic image analysis determination of sessile drop shapes / R.S. Bachevsky, Y.V. Naidich, M.F. Grygorenko et al. // *Proc. Int. Conf. "High Temperature Capillarity"* (Smolenice Castle,

May 1994) / Ed. N.Eustathopoulos. - Bratislava, 1995. - P. 254-258. 11. Кісіль Р. І., Порєв Г. В. Вимірювання геометричних розмірів обертової краплі за допомогою телевізійної системи контролю // *Методи та прилади контролю якості.*-2000.-№5.- С.87-91. 12. Карла М., Чеккини Р., Борди С. Автоматический прибор для измерений межфазного натяжения методом лежащей капли // *Приборы для научных исследований.* - 1991. - №4. - С. 126-131. 13. Muravsky L.I., Bachevsky R.S., Stefansky A.I. Evaluation of substance surface properties measuring errors with optical-digital diagnostic system // *Proc. SPIE.* - 2648. - P. 645-649. 14. Kulynych Y.P., Voronyak T. I., Maksymenko O.P. Principles of design of an optical/digital system for the high-temperature melt interfacial tension measurement // *Proc. SPIE* - 4148 P. 252-256. 15. Муравський Л.І., Бачевський Р.С., Вороняк Т.І. Досвід використання оптико-цифрових систем для вимірювання капілярних характеристик матеріалів // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* - 1997. - № 5. - С. 81-87. 16. Волосов Д.С. Фотографическая оптика. -М.: Искусство, 1978.- 543с. 17. Приборы с зарядовой связью / Под. ред. М. Хоуза, Д. Моргана. - М.: "Энергоиздат" 1981.-376с. 18. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. - М.: Радио и связь, 1991.- 264 с. 19. Кузнецов Ю.А., Скрылев А.С., Шилин В.А. Приборы с зарядовой связью - элементная база твердотельных оптико-электронных систем // *Оптическая техника.* - 1996. - №1 (9). - С. 10-17. 20. Ярославський Л.П. Введение в цифровую обработку изображений.- М.: Сов.радио, 1979.- 312с. 21. Ярославський Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии : Введение в цифровую оптику. -М.: Радио и связь, 1987.- 296с. 22. Русин Б.П. Системи синтезу, обробки та розпізнавання складно-структурованих зображень. -Львів: Вертикаль, 1997.- 264с.