

## FOTOGRAMETRYCZNY SPOSÓB POMIARU UŁOŻENIA WARSTW MATERIAŁU W OBROTOWYM BĘBNIE

*Anatol Kalisiewicz*

Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa w Warszawie,  
Oddział w Kłudzienku

### WSTĘP

Ruch materiału w obrotowym bębnie, na przykład suszarki lub chłodziarki, ma istotny wpływ na procesy wymiany ciepła i masy. Analiza więc ruchu lub układania się warstw materiału w takim bębnie może mieć dużą przydatność praktyczną do doskonalenia konstrukcji i technologicznych wskaźników pracy bębnowych suszarek, chłodziarek czy mieszarek.

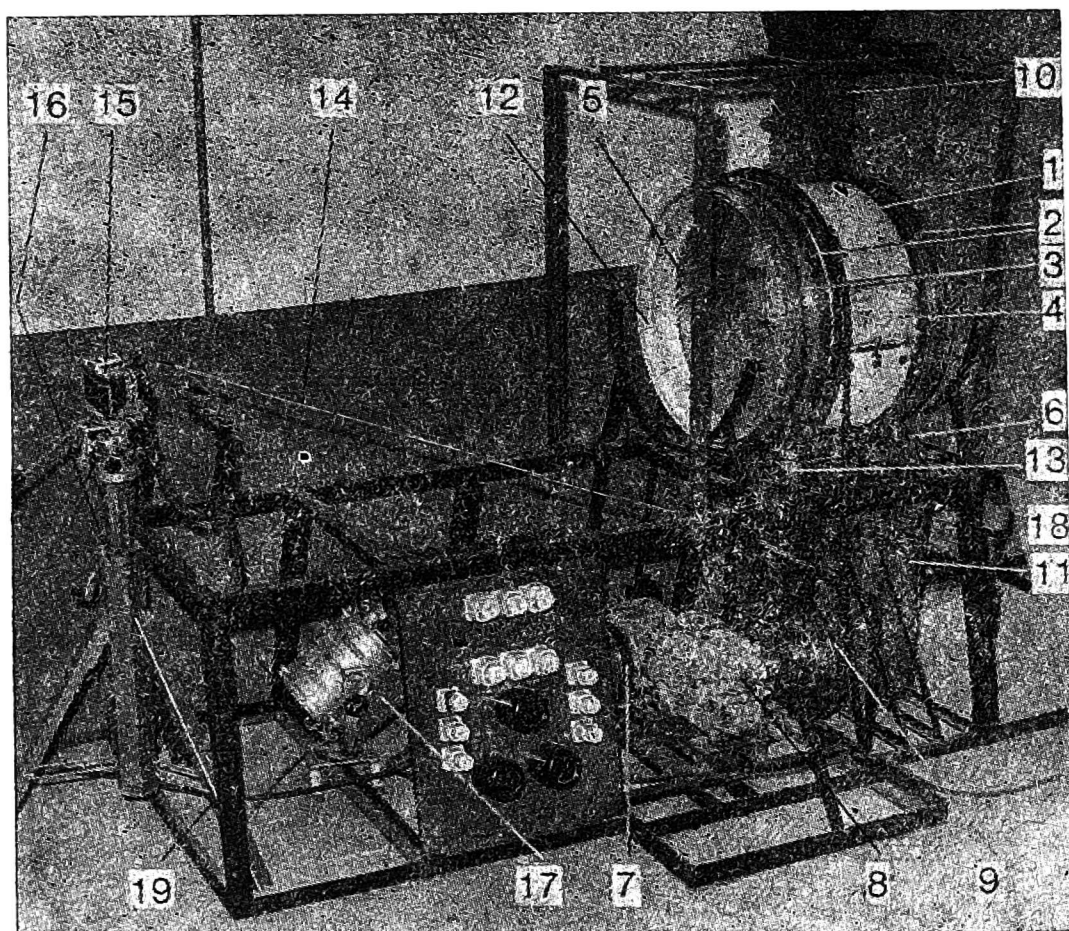
Analityczne opracowanie matematycznego modelu, charakteryzującego ułożenie materiału w obrotowym bębnie z wewnętrzną zabudową w postaci łopat, półek i przegród o różnych kształtach i wymiarach, jest zadaniem złożonym. Nawet w najprostrzych przypadkach, na przykład dla bębna z jedną łopata, przy założeniu szeregu uproszczeń, istnieją skomplikowane zależności od parametrów konstrukcyjnych bębna [3]. Założenia analityczne wywodzą się na ogół z idealnych warunków przepływu materiału. Zakłada się na przykład, że powierzchnia swobodnego ułożenia materiału tworzy płaszczyznę [2]. Praktyczna przydatność związków, uzyskanych w ten sposób, jest stosunkowo niewielka ze względu na daleko posunięte uproszczenia i występowanie wielu trudnych do wyznaczenia współczynników, korygujących proponowane modele matematyczne.

Aby zbadać złożone zjawisko układania się ruchomych warstw materiału w obracającym się bębnie, opracowano jednoobrazową metodę fotogrametryczną [1, 4] dla obiektu przestrzennego, jaki stanowi materiał w segmencie bębna. Proponowana metoda opiera się na zastosowaniu specjalnego stanowiska pomiarowego oraz elektronicznej techniki rejestrującej i obliczeniowej.

## OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO I JEGO DZIAŁANIE

Stanowisko pomiarowe, służące do wykonywania zdjęć obracającego się segmentu bębna wraz z materiałem, składa się z zespołu bębna, urządzeń do fotografowania, instalacji oświetleniowej, urządzeń kontrolnych i pomocniczych. Zespół bębna tworzy cylindryczna obudowa (rys. 1) z dwoma pierścieniami tocznymi, pierścieniem prowadzącym i otworem z pokrywą do zasypywania i wysypywania materiału. Do obudowy można wstawiać wymienne wkładki zabudowy bębnow. Wkładki takie zamyka się z obu stron szybami lub siatką drucianą. Bęben obracający się na rolkach jest napędzany od silnika elektrycznego poprzez przekładnię klinową bezstopniową, reduktor i przekładnię łańcuchową. Materiał do bębna wysypuje się z zasobnika. Do zabierania wysypywanego z bębna materiału służą pojemniki.

Pierścień ze skrzydełkami mocuje się na obudowie bębna tak, by jego skrzydełka tworzyły zadany kąt względem łopat wkładki bębna. W gło-



Rys. 1. Ogólny widok stanowiska pomiarowego do badania ułożenia materiału w segmencie bębna: 1 — cylindryczna obudowa, 2 — pierścień toczny, 3 — pierścień prowadzący, 4 — pokrywa, 5 — wymienna wkładka zabudowy, 6 — rolki toczne, 7 — przekładnia klinowa, 8 — reduktor, 9 — przekładnia łańcuchowa, 10, 11 — zasobniki na materiał ziarnisty, 12 — pierścień ze skrzydełkami, 13 — głowica z tłoczkiem i sprężyną, 14 — rurka, 15 — aparat fotograficzny, 16 — statyw aparatu fotograficznego, 17 — reflektor, 18 — ekran, 19 — rama

wicy znajduje się tłoczek, osadzony na sprężynie i poruszający się w prowadnicy. Tłoczek ten za pomocą drutu stalowego, umieszczonego w rurce metalowej, jest połączony z wężykiem aparatu fotograficznego. Głowicę można poprzez jej obrócenie ustawić tak, że w czasie obrotu bębna jedno ze skrzydełek pierścienia uderza w tłoczek, przekazując dalej impuls do wyzwolenia migawki aparatu fotograficznego. Aparat jest ustawiony na statywie. Należy dodać, że impuls do wyzwolenia migawki może być przekazywany także w inny sposób, np. elektryczny.

Do oświetlenia materiału w bębnie użyto trzech reflektorów. Za bębniem od strony przeciwległej do aparatu fotograficznego ustawiono ekran, tworzący tło do zdjęć. Podstawowe zespoły zamontowano na ramie.

Opisane stanowisko pomiarowe umożliwia badanie różnej konstrukcji wewnętrznej zabudowy bębnow, uzyskiwanie dowolnego stopnia wypełnienia bębna materiałem (od 0 do 1), bezstopniową regulację obrotów w szerokim przedziale oraz wykonywanie zdjęć ułożenia materiału dla dowolnego z góry przyjętego kąta obrotu bębna.

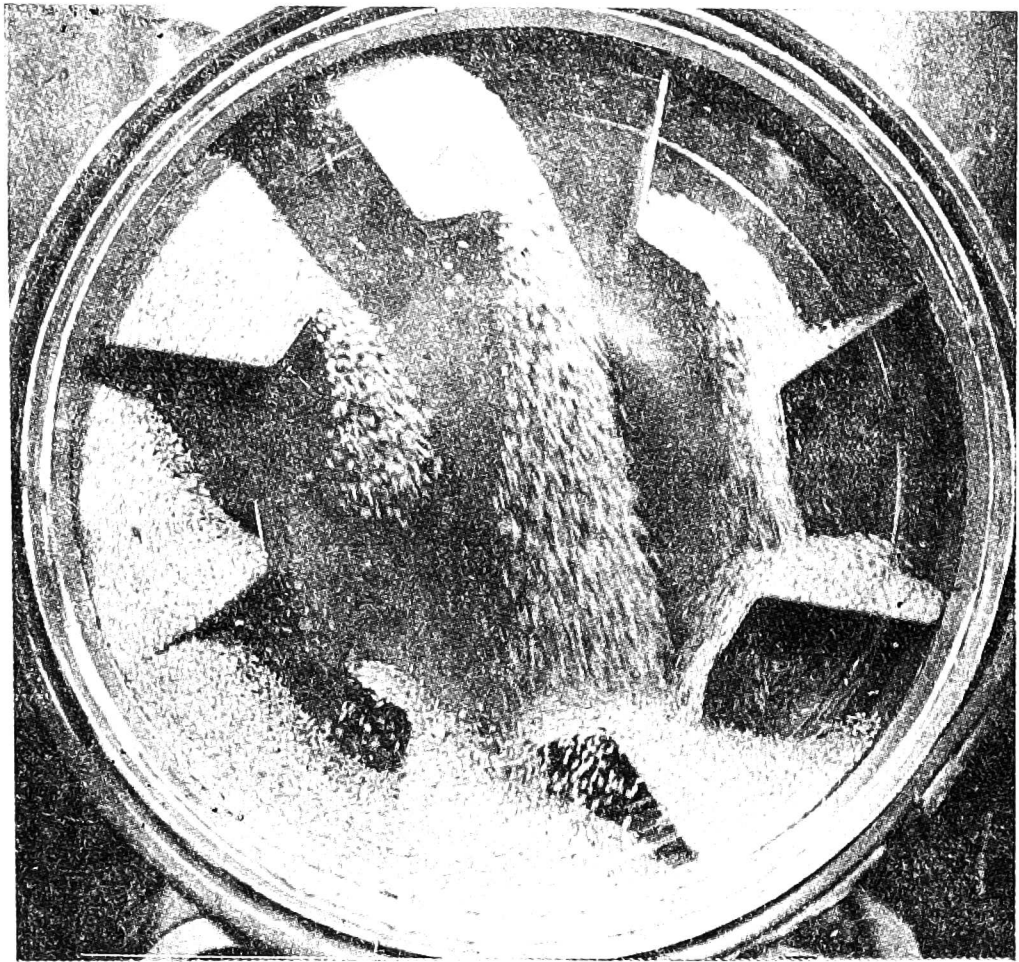
#### OPIS SPOSOBU POMIARU I OBLICZEŃ

Liczbę zdjęć, przypadających na jeden obrót bębna, uzależnia się od liczby łopat zabudowy wewnętrznej. Dla jednej łopaty wykonywano w równych odstępach kątowych 12 lub 24 zdjęć na jeden obrót bębna. Przy większej liczbie łopat wykonuje się mniejszą liczbę zdjęć.

Dla obiektu obracającego się z dużą prędkością obwodową, jakim jest segment bębna, trzeba było przyjąć mały czas ekspozycji, wynoszący 1/500 s. Przy oświetleniu reflektorami o łącznej mocy 12 kW i wykorzystaniu filmu o dużej czułości 27 DIN przesłonę nastawiono na 8.

Analizę ułożenia warstw materiału przeprowadzono na odbitkach fotograficznych, wykonanych na papierze światłoczułym. Przykładowo odbitkę fotograficzną dla ziarna pszenicy w bębnie z 8 łopatkami przy 24 obrotach bębna o średnicy 0,62 m pokazano na rysunku 2. Dalsza obróbka zdjęć możliwa jest przy zastosowaniu planimetrów lub za pomocą elektronicznej techniki rejestrującej i obliczeniowej. Większą dokładność i bardziej wszechstronną analizę zapewnia zastosowanie maszyn elektronicznych.

Do analizy na komputerach cyfrowych potrzebne jest wyznaczenie współrzędnych poszczególnych punktów, leżących na liniach brzegowych warstw materiału znajdującego się w bębnie. Punkty te nanosi się na odbitkach tak, żeby odległość między sąsiednimi punktami można było w miarę dokładnie aproksymować odcinkami prostych (z wyjątkiem łuków



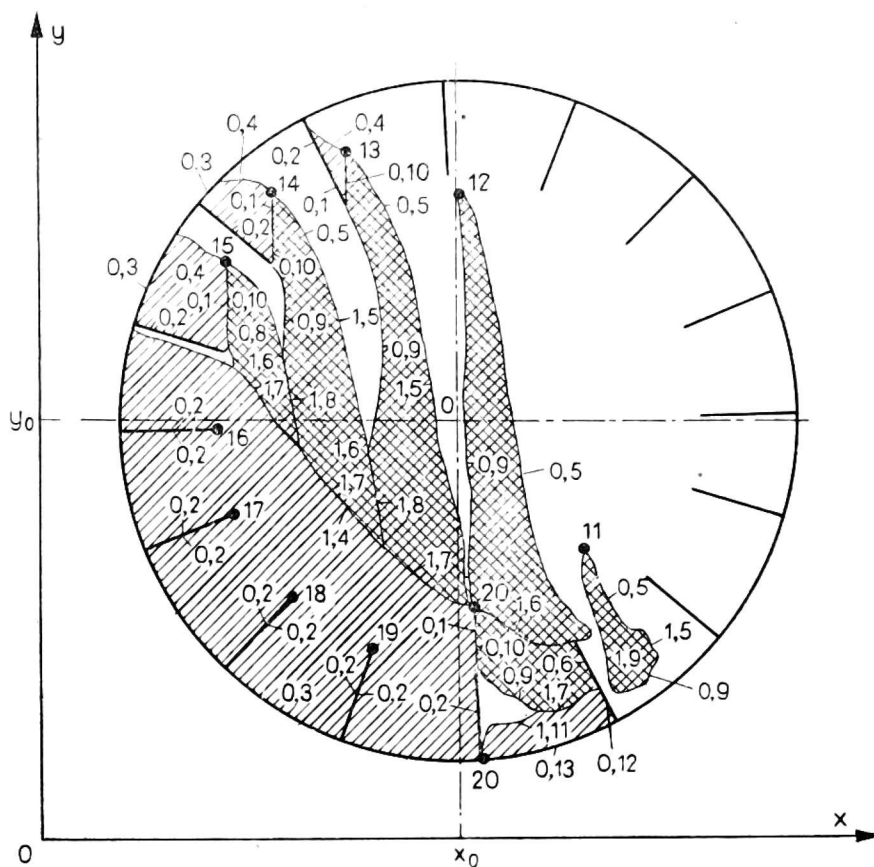
Rys. 2. Zdjęcie wykonane dla obracającego się bębna z 8 wygiętymi łopatkami przy wypełnieniu go ziarnem

okręgu). Wszystkie linie należy odpowiednio oznakować. W obrotowych bębnach można na przykład przyjąć następujące znakowanie linii (rys. 3)\*.

- 1, 10 — linie oddzielające warstwę opadającego materiału od warstwy zalegającego na łopacie materiału,
- 2, 12, 14 — linie styku materiału z łopatkami,
- 3, 13 — linie styku materiału zalegającego z cylindryczną obudową bębna,
- 4, 11 — linie styku materiału z czynnikiem i z warstwą materiału opadającego,
- 5, 9 — linie styku materiału opadającego z czynnikiem,
- 6, 8 — linie styku materiału opadającego z materiałem opadającym z sąsiednich łopat,
- 7 — linie styku materiału opadającego z materiałem zalegającym na spodzie bębna lub na innych łopatkach.

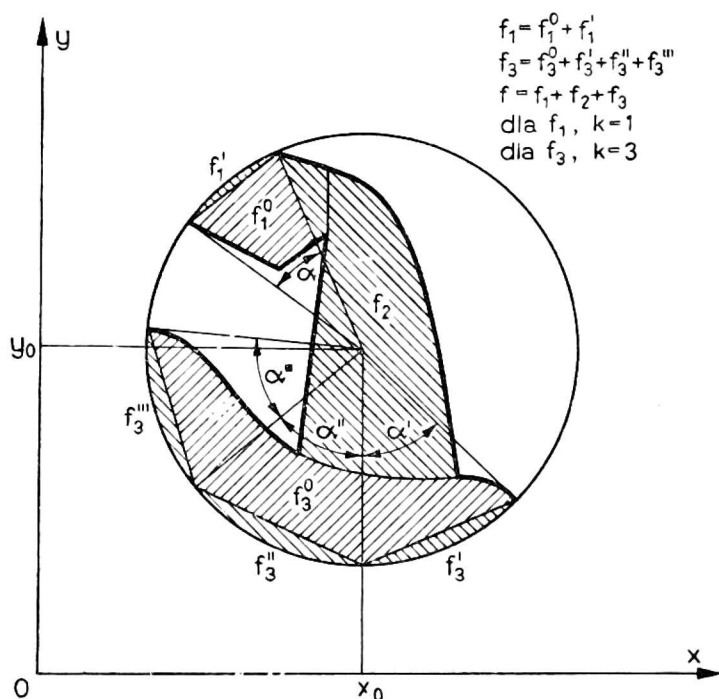
---

\* Liczba 0 umieszczona przed numerami linii oznacza brak poprawki przy obliczaniu współrzędnych punktów, liczba 1 — poprawkę.



Rys. 3. Przykład oznakowania linii ograniczających ułożenie warstw materiału na poprzecznym przekroju bębna

Można także oznakować odpowiednio pola powierzchni na przekroju poprzecznym bębna, np. zajęte przez materiał zalegający na łopatach przez  $f_1$ , przez materiał opadający —  $f_2$ , a przez materiał zalegający na spodzie bębna —  $f_3$  (rys. 4). Podziału na linie i pola dokonywano oddzielnie dla każdej łopaty.



Rys. 4. Przykład oznakowania pól zajętych przez materiał na poprzecznym przekroju bębna:  $f_1$  — materiał zalegający na łopacie,  $f_2$  — materiał opadający z łopaty,  $f_3$  — materiał zalegający na spodzie bębna

Współrzędne poszczególnych punktów, opisujących położenie materiału w bębnie, wyznaczono ze zdjęć na koordynatografie automatycznym KART-2 z przystawką rejestrującą, zapisując je bezpośrednio na taśmie perforowanej. Początek prostokątnego układu współrzędnych zaleca się umieszczać tak, by wszystkie punkty na zdjęciu miały dodatnie wartości współrzędnych\*.

Zapis danych można prowadzić według następującego schematu:

$$\begin{array}{l}
 nr, y_0, x_0, nl, nk, p, y_1, y_1, \\
 \quad p, y_2, x_2, \\
 \quad \dots \\
 \quad p, y_i, x_i, \\
 \quad \dots \\
 \quad p, y_n, x_n, -1, \\
 nk, \dots \\
 \quad \dots \\
 \quad p, y_n, x_n, -1, -2, \\
 nl, \dots \\
 \quad \dots \\
 \quad p, y_n, x_n, -1, -2, -3, \\
 nr, y_0, x_0, \dots \\
 \quad \dots \\
 \quad p, y_n, x_n, -1, -2, -3?,
 \end{array}$$

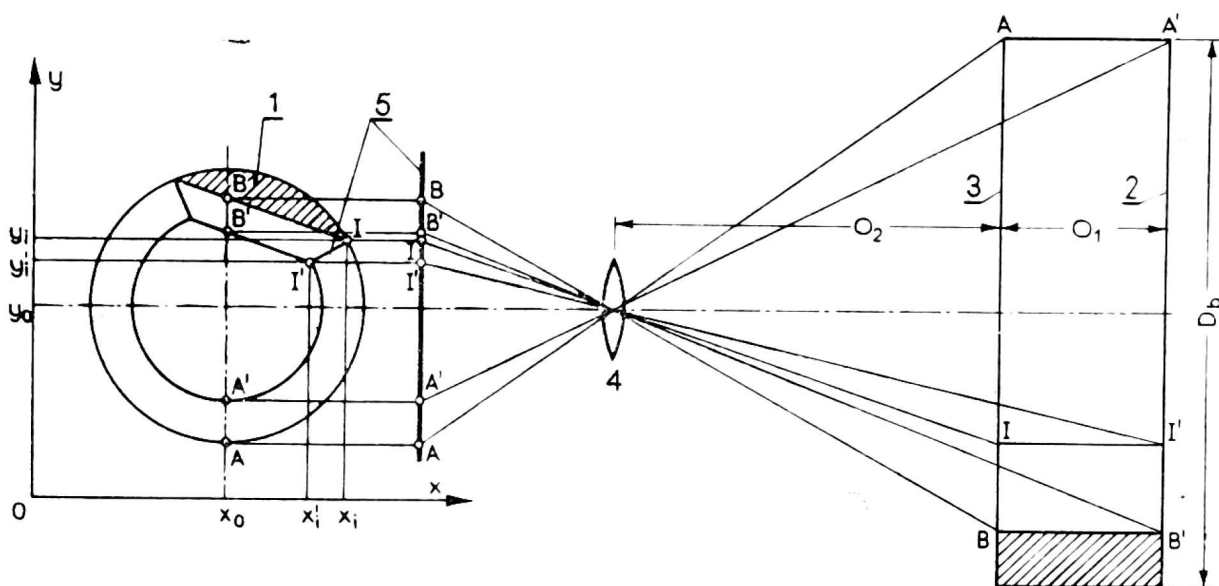
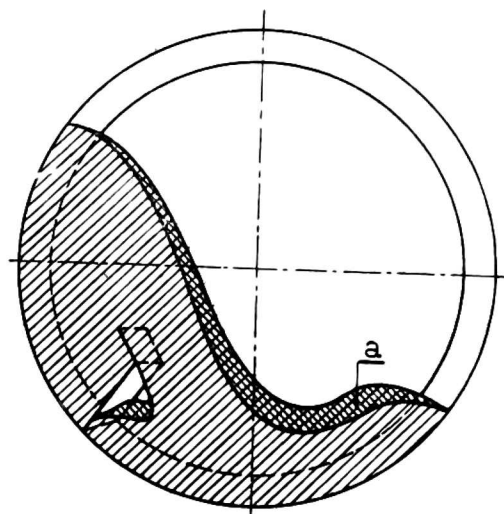
gdzie:

- $nr$  — numer zdjęcia,
- $nl$  — numer łopaty,
- $nk$  — numer krzywej,
- $x_0, y_0$  — współrzędne środka bębna,
- $x_i, y_i$  — współrzędne  $i$  — tego punktu,
- $p$  — znak poprawki,
- $-1$  — symbol zakończenia opisu krzywej,
- $-2$  — j.w. ale łopaty,
- $-3$  — j.w. ale zdjęcia.

By prawidłowo odwzorować przedmiot przestrzenny (rys. 5), jaki stanowi bęben z materiałem, na podstawie jednego zdjęcia współrzędne niektórych punktów oblicza się z poprawką. Poprawkę  $p$  nanosi się albo dla punktów warstwy, położonych przy szybie ustawionej od strony ekranu, albo od strony aparatu foto, sprowadzając położenie wszystkich punktów do jednej płaszczyzny. Jeżeli sprowadza się położenie punktów do płaszczyzny utworzonej przez szybę od strony aparatu fotograficznego (rys. 6),

\* Przytoczone w dalszej części wzory zostały wyprowadzone na bazie takiego układu współrzędnych.

Rys. 5. Schemat przestrzennego ujęcia warstwy materiału na odbitce fotograficznej: a — powierzchnia warstwy widoczna na zdjęciu a równoległa do wzdłużnej osi bębna



Rys. 6. Schemat obliczania poprawki: 1 — warstwa materiału w segmencie bębna, 2 — szyba od strony ekranu, 3 — szyba od strony aparatu fotograficznego, 4 — obiektyw aparatu, 5 — negatyw zdjęcia

to rzeczywiste współrzędne  $i$ -tego punktu  $x_i$  i  $y_i$  w układzie, kiedy przyjmuje się dodatnie ich wartości, oblicza się z zależności:

$$x_i = \frac{O_1}{O_2} (x_i - x_0) + x_i \quad (1)$$

$$y_i = \frac{O_1}{O_2} (y_i - y_0) + y_i \quad (2)$$

gdzie:

$O_1$  — odległość pomiędzy szymbami wkładki segmentu bębna, mm,

$O_2$  — odległość od obiektywu aparatu do wkładki bębna, mm.

Dla punktów, gdzie poprawka  $p = 0$ ,  $x_i = x'_i$  oraz  $y_i = y'_i$ .

Przyjęty sposób zapisów danych umożliwia obliczanie wskaźników charakteryzujących położenie i ruch warstw materiału w różnorodnych, potrzebnych do analizy, wariantach.

Długość  $j$ -tej krzywej  $l_j$  (z wyjątkiem łuku okręgu) oblicza się na podstawie współrzędnych punktów leżących na tej krzywej przez aproksymację linią łamaną:

$$l_j = s_f \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (3)$$

gdzie:

$s_f$  — skala zdjęcia,

$n$  — liczba punktów,

$x_{i+1}, y_{i+1}$  — współrzędne punktu  $i+1$  na zdjęciu, mm.

Długość krzywych  $l_{3,13}$ , stanowiących część łuku okręgu (obudowy bębna), można obliczyć z równania:

$$l_{3,13} = 0,5 D_b \cdot \alpha_{3,13} \quad (4)$$

gdzie:

$D_b$  — średnica wewnętrzna segmentu bębna, mm,

$\alpha_{3,13}$  — kąt środkowy łuku krzywej, oznaczonej nr 3 i 13 (rys. 4).

Do obliczeń numerycznych długości łuku okręgu konieczne jest określenie, w której ćwiartce koła leżą punkty krzywej. W tym celu analizuje się następujące warunki:

$$1. \quad (y_1 \geq y_0 \wedge y_{i+1} \geq y_0) \vee (y_i \leq y_0 \wedge y_{i+1} \leq y_0),$$

$$2. \quad (x_i \geq x_0 \wedge x_{i+1} \geq x_0) \vee (x_i \leq x_0 \wedge x_{i+1} \leq x_0).$$

Jeżeli spełnione są oba warunki, to długość łuku 3,13 oblicza się z równości:

$$l_{3,13} = R_b \cdot |(\arcsin X_i - \arcsin X_{i+1})| \quad (5)$$

Przy spełnionym pierwszym warunku:

$$l_{3,13} = R_b (\arcsin X_i + \arcsin X_{i+1}) \quad (6)$$

Przy spełnieniu tylko drugiego warunku:

$$l_{3,13} = R_b (\arcsin Y_i + \arcsin Y_{i+1}) \quad (7)$$



gdy oba warunki nie są spełnione:

$$l_{3,13} = R_b (1,57 + \text{arc sin } X_i + \text{arc sin } Y_{i+1}). \quad (8)$$

W równaniach 5÷8 oznacza się:

$$X_i = \frac{x_i - x_0}{R_b} \quad (9)$$

$$X_{i+1} = \frac{x_{i+1} - x_0}{R_b} \quad (9a)$$

$$Y_i = \frac{y_i - y_0}{R_b} \quad (9b)$$

$$Y_{i+1} = \frac{y_{i+1} - y_0}{R_b} \quad (9c)$$

gdzie

$R_b$  — promień bębna, mm.

Dla przykładu pola  $f_2$  oraz częściowo pola  $f_1$  i  $f_3$  oblicza się według wzoru Gaussa:

$$f_{1,2,3}^{(o)} = 0,5 \sum_{i=1}^n y_i (x_{i-1} + x_{i+1}). \quad (10)$$

Na obliczenie odcinków pól zawartych pomiędzy łukiem okręgu i prostymi (rys. 4) wyprowadza się zależności na podstawie wzoru:

$$f_{1,3}^{(j)} = 0,5 R_b^2 (a - \sin a) \quad (11)$$

gdzie

$a$  — kąt środkowy, w którym zawarty jest odcinek pola. Analizuje się te same warunki, jak przy obliczeniu długości łuku. Jeżeli spełnione są dwa warunki, pola odcinków oblicza się z równania:

$$f_{1,3}^{(j)} = 0,5 R_b^2 (|\text{arc sin } X_i - \text{arc sin } X_{i+1}| - \sin |\text{arc sin } X_i - \text{arc sin } X_{i+1}|) \quad (12)$$

Przy spełnionym tylko pierwszym warunku:

$$f_{1,3}^{(j)} = 0,5 R_b^2 (\text{arc sin } X_i + \text{arc sin } X_{i+1} - \sin (\text{arc sin } X_i + \text{arc sin } X_{i+1})) \quad (13)$$

Przy spełnionym drugim warunku:

$$f_{1,3}^{(j)} = 0,5 R_b^2 (\arcsin Y_i + \arcsin Y_i + 1 - |\sin (\arcsin Y_i + \arcsin Y_i + 1)|) \quad (14)$$

Jeśli żaden z warunków nie jest spełniony, to:

$$f_{1,3}^{(j)} 0,5 = R_b^2 (0,57 + \arcsin X_i + \arcsin X_i + 1 - |\sin (1,57 + \arcsin X_i + \arcsin X_i + 1)|) \quad (15)$$

Zapis współrzędnych punktów na taśmie perforowanej, ze względu na bardzo dużą liczbę danych, sięgającą niekiedy kilkaset tysięcy, należy sprawdzać na komputerze cyfrowym. Dalsze obliczenia rządanych wielkości, które mogą charakteryzować zjawisko ruchu materiału w bębnie, należy prowadzić według odpowiednich programów także na komputerze cyfrowym.

#### ZASTOSOWANIE OPRACOWANEJ METODY

Opisana metoda była stosowana przy badaniu ułożenia warstw materiału w różnych konstrukcyjnie bębnach, przy różnych obrotach bębna i różnych jego wypełnieniach materiałem. Badania prowadzono na materiałach rolniczych, zdecydowanie różniących się cechami fizycznymi, na przykład na ziarnie pszenicy, siewce zielonki, suszu z zielonki i brykietach paszowych. We wszystkich przypadkach okazała się ona przydatna do szczegółowej analizy ruchu warstw materiału w obrotowym bębnie z zabudową wewnętrzną i bez zabudowy.

O błędach wartości wskaźników charakteryzujących ułożenie materiału w bębnie decydują błędy pomiarów na stanowisku badawczym, błędy obróbki zdjęć oraz błędy uproszczeń przy obliczeniach. W czasie badań uzyskano wystarczającą dokładność pomiarów i obliczeń wskaźników (tab. 1). Dokładność opracowanej metody w razie potrzeby można zwiększyć przez:

- zwiększenie częstotliwości wykonywania zdjęć na jeden obrót bębna,
- powtarzanie zdjęć w danych warunkach pomiaru i
- wykonywanie odbitek na szklanych płytach fotograficznych.

Tabela 1

Średnie błędy kwadratowe wyznaczania charakterystycznych długości i pola, utworzonych przez warstwy materiału w bębnie z jedną łopata

Lp.	Wyszczególnienie	Jedn. miary	Wartości		
			$\bar{X}$	$\bar{S}$	$\bar{\delta}, \%$
1	Długość linii styku materiału z elementami zabudowy i obudową bębna	m*	1,13	0,0068	0,6
2	j.w. ale materiału zalegającego na zabudowie i obudowie bębna z czynnikiem	m	0,62	0,023	3,7
3	j.w. ale warstwy opadającego z elementów zabudowy materiału z czynnikiem	m	0,90	0,04	4,4
4	Całkowite pole powierzchni materiału na przekroju poprzecznym bębna	m <sup>2</sup>	0,122	0,0014	1,1

\* Względny błąd  $\bar{\delta}$  obliczono w procentach.

Oznaczenie:  $\bar{X}$  — wartość średnia;  $\bar{S}$  — średni błąd kwadratowy;  $\bar{\delta}$  — względny średni błąd kwadratowy.

## WNIOSKI

1. Jednoobrazowa fotogrametryczna metoda jest w pełni przydatna do badania ułożenia warstw materiału w obrotowym bębnie, przede wszystkim dla materiałów ziarnistych i sypkich. Mogą wystąpić pewne trudności przy jej zastosowaniu do badań materiałów pylistych.

2. Metoda może być stosowana przy badaniach innych obiektów, w tym także rolniczych, znajdujących się w ruchu lub podlegających zmianom kształtu i wymiarów, jak na przykład do analizy ruchu warstwy ziarna w komorze suszarni, osiadanie siana w stertach itp.

3. Metoda zapewnia wysoką dokładność pomiarów i obliczeń, którą zależnie od potrzeb można zwiększyć, np. przez zastosowanie szklanych płyt fotograficznych.

4. Opracowane równania na obliczanie wskaźników charakteryzujących ułożenie materiału w obrotowym bębnie są przydatne przy zastosowaniu elektronicznej techniki rejestrującej i obliczeniowej.

5. Opisane stanowisko pomiarowe umożliwiło badanie zabudowy wewnętrznej bębnow o odmiennej konstrukcji, uzyskiwanie dowolnych

stopni wypełnienia bębna materiałem, bezstopniową regulację obrotów bębna oraz wykonywanie zdjęć ułożenia warstw materiału dla żadanego kąta obrotu bębna.

#### LITERATURA

1. Hallert B.: Photogrammetry. Nowy York, Toronto, Londyn, 1960.
2. Michajłow N. M.: Woprosy suszki topliwa na elektrostancjach. Gozenergoizdat, Moskwa, Leningrad, 1957.
3. Mikucki K. Powierża L.: Badanie średniej ważonej wysokości opadania cząstek z łopatkki bębna suszarki. Biul. Prac. Nauk.-Bad. IBMER, 1973.
4. Sitek Z.: Fotogrametria z fotografią techniczną. AGH Kraków, 1972.

*Анатолий Калисевич*

#### ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ СЛОЕВ МАТЕРИАЛА НА ВРАЩАЮЩЕМСЯ БАРАБАНЕ

##### Резюме

Фотограмметрический метод одной съемки разработан с целью испытания сложного явления распределения подвижных слоев материала на поперечном сечении вращающегося барабана. В основу метода было принято использование электронной регистрирующей и вычислительной техники.

Чтобы получить соответствующие съемки, был построен испытательный стенд, составленный из сегмента барабана с приводом комплекта устройств для фотографирования осветительных, управляющих и вспомогательных устройств.

В результате проведенных на стенде измерений были получены съемки представляющие пространственное расположение слоев материала в сегменте барабана заданной внутренней конструкции. Для дальнейшего анализа съемок, береговые линии слоев материала и характерные поля поверхности материала обозначались в определенном порядке. На береговых линиях слоев намечали ряд точек, координаты которых определяли с помощью автоматического прибора (координатографа), снабженного регистрирующим устройством для непосредственной записи координат на перфорированную ленту.

Определение принятых показателей, характеризующих расположение материала проводилось на ЭВМ Одра-1204 на основе разработанных алгоритмов.

Указанный метод может использоваться для анализа расположения и движения разных сельскохозяйственных материалов в различных объектах, например в силосных башнях, складских помещениях, зерносушилках и тп.

*Anatol Kalisiewicz*

PHOTOGRAMMETRIC METHOD OF MEASUREMENT OF THE  
ARRANGEMENT OF MATERIAL LAYERS IN A ROTATIONAL DRUM

S u m m a r y

Single-shot photogrammetric method has been developed to study a complex phenomenon of arrangement of mobile material layers on the rotational drum cross-section. The method is based on application of the electronic recording and computation technique.

For execution of shots a measurement stand consisting of a segment of the drum with drive, a set of devices for taking shots of lighting installation, steering and auxiliary appliances, has been built.

In consequence of investigations at the measurement stand shots were obtained, presenting the spatial arrangement of particular material layers in the drum segment, of a chosen internal construction. To analyze the material arrangement, borderlines of particular layers and characteristic fields of the material surface on the drum shot were appropriately marked. On borderlines of layers a number of points was plotted, the coordinates of which were marked on an automatic coordinatograph with the recording attachment for their direct recording on the perforated tape.

Determination of assumed indices, characterizing arrangement of the material was done on the basis of algorithms worked out on the digital computer of Odra-1204.