

Rafał Przywarski\*, Krzysztof Grudzień\*, Andrzej Romanowski\*,  
Mariusz Rząsa\*\*, Radosław Wajman\*

## Metody wyznaczania map czułości dla systemu tomografii optycznej

### 1. Wprowadzenie

Tomografia optyczna jest techniką rozwijaną do zastosowań badawczych oraz monitorowania i kontroli przepływów dwufazowych [4, 5]. Szczegółowy opis zjawisk związanych z tomografią optyczną można znaleźć w [1]. Używany przez autorów prototypowy system tomograficzny składa się z pięciu projekcji, które dokonywane są w pięciu osobnych płaszczyznach. Projekcje iluminują badaną przestrzeń zamkniętą wewnątrz szklanej rury. Natomiast zapis wartości pomiarowych odbywa się dla światła, odebranego po przebyciu przestrzeni badanej, za pomocą listwy 64 detektorów dla każdej z pięciu płaszczyzn. Znajomość drogi promienia pomiędzy źródłem a detektorem pozwala zrekonstruować obraz przy użyciu wyznaczonej macierzy czułości.

Szklana rurka może zostać zamodelowana jako obszar przestrzeni o pewnym współczynniku załamania ograniczony dwoma cylindrami. Ponieważ wszystkie detektory znajdują się w jednej płaszczyźnie, zatem wszystkie obliczenia można przeprowadzić w tej właśnie płaszczyźnie zgodnie z rysunkiem 1.

Dla układu źródło światła – czujnik, jak na rysunku 1, w celu znalezienia macierzy czułości należy prześledzić drogę, jaką pokonuje promień. Po wyjściu ze źródła ulega on załamaniu na granicy dwóch ośrodków (powietrza i szkła) zgodnie z prawem Snella

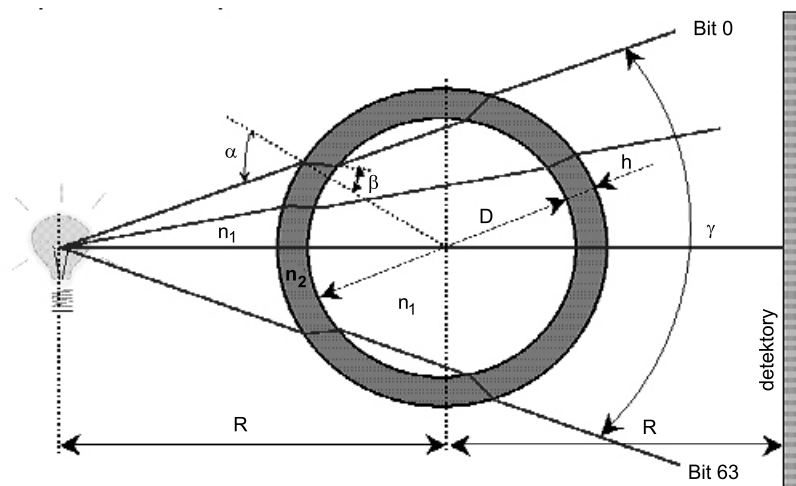
$$n_{\alpha} \sin \alpha = n_{\beta} \sin \beta \quad (1)$$

Kolejno promień ulega jeszcze kolejnym trzem załamaniom (dla wypełnienia przestrzeni jednorodnym medium), zgodnie z rysunkiem 2. Po opuszczeniu rury, następnie promień trafia do czujnika. Należy zauważyć, że promień wpada do czujnika pod pewnym kątem, który nie jest znany. Dlatego nie jest możliwe śledzenie promienia od czujnika do źródła. Z tego powodu stosowane jest przeszukiwanie binarne. Pozwala to na wyznaczenie szukanego promienia z dowolną, skończoną dokładnością.

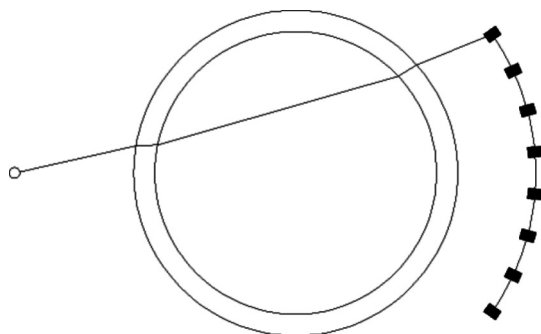
---

\* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka w Łodzi

\*\* Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej, Politechnika Opolska w Opolu



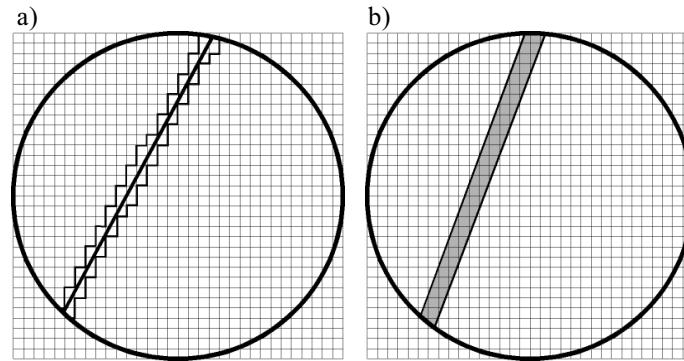
Rys. 1. Schemat zjawisk obecnych w przestrzeni badanej tomografii optycznej



Rys. 2. Uproszczony schemat przejścia promienia światła przez badany rurociąg oraz przestrzeń pomiarową na drodze do detektora

## 2. Metody wyznaczania map czułości

W zależności od użytej metody, macierz czułości można wyznaczyć na jeden z dwóch sposobów. Podczas przeszukiwania binarnego wyznaczone zostały fragmenty promieni znajdujące się wewnątrz rury. Wykorzystywane są do wyznaczenia macierzy czułości w metodzie pierwszej (rys. 3a). Natomiast w przypadku drugiej metody nie są śledzone promienie (ponieważ nie są odcinkami), lecz półproste ograniczające wiązkę (rys. 3b). Częścią wspólną płaszczyzny oraz snopa, w kształcie którego rozchodzi się światło, w naszym przypadku są dwie półproste o wspólnym początku. Obliczenia są wykonywane dla obydwu półprostych analogicznie jak w przypadku pojedynczego promienia.



**Rys. 3.** Graficzne przedstawienie przechodzących przez kwadraty siatki: a) promieni; b) wiązki ograniczonej dwoma promieniami

Pierwszy sposób opisany jest za pomocą równania

$$W_{[i,j]} = \begin{cases} \frac{1}{k_i} & \text{dla } k_i > 1 \\ 0 & \text{dla } k_i \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

gdzie  $k$  – liczba promieni przechodząca przez dany kwadrat  $i$  (rys. 3a).

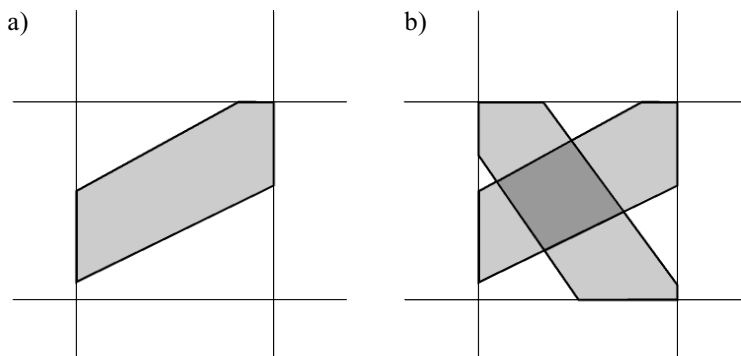
Druga metoda jest zgodna z opisem

$$W_{[i,j]} = \frac{s_{ij}}{S_i} \quad (3)$$

gdzie:

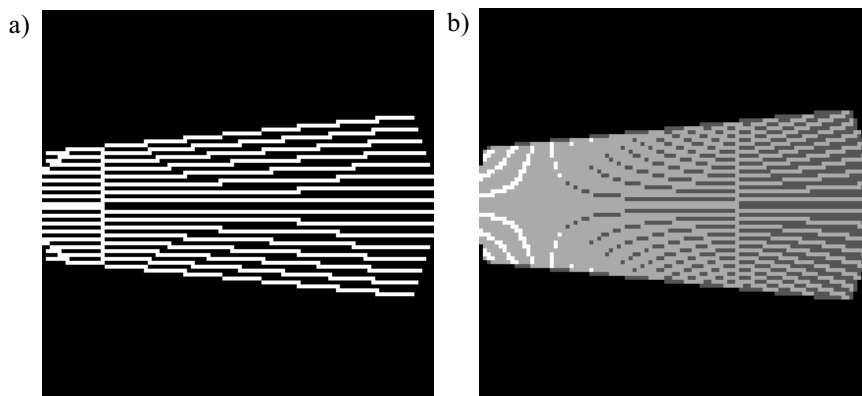
$s_{ij}$  – pole promienia  $j$  w kwadracie  $i$  (rys. 4a),

$S_i$  – suma pól wszystkich promieni w  $i$ -tym elemencie obrazu (rys. 4b).



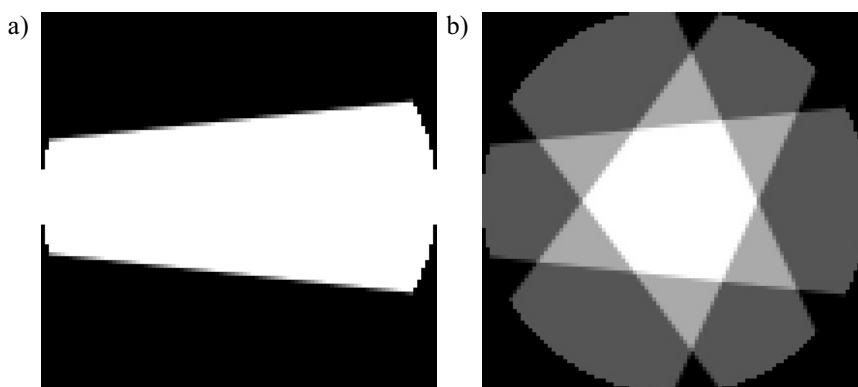
**Rys. 4.** Graficzne przedstawienie zliczania pola powierzchni promienia przechodzącego poszczególne kwadraty siatki: a) pojedynczy promień; b) suma pól wszystkich promieni

Rysunek 5 przedstawia wartości  $k_i$  dla pojedynczego źródła i odpowiednio 16 oraz 64 promieni. Warte uwagi jest niepełne pokrycie pola wiązki w przypadku 16 promieni oraz nadmiar (w stosunku do liczby pikseli obrazu) w przypadku 64 promieni.



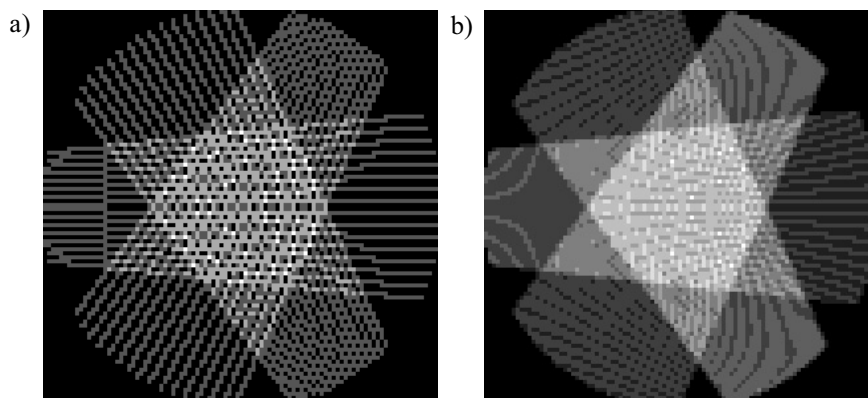
**Rys. 5.** Pokrycie wiązki światła przechodzącej przez rurę dla: a) 16 promieni; b) 64 promieni

Rysunek 6a przedstawia sumy pól promieni dla każdego kwadratu siatki obrazu – piksela. Należy zwrócić uwagę, że nie występują tu problemy nieciągłości oraz nadmiaru niezależnie od liczby czujników. Kierując się prostą logiką, można stwierdzić, że lepszy obraz powinien być generowany na bazie pełniejszego pokrycie pola projekcji. Z drugiej jednak strony, z praktyki tomograficznej może wynikać, że wystarczający dla generowania zadowalających obrazów może okazać się takie niepełne pokrycie pojedynczej wiązki, pod warunkiem, że kilka projekcji skierowanych z różnych stron pokryje ten obszar na zasadzie interpolacji.



**Rys. 6.** Graficzne przedstawienie sumy pól promieni dla pokrycia wszystkich elementów siatki w wiązce: a) wiązka pojedyncza; b) potrójna wiązka

Kolejne rysunki odzwierciedlają analogiczne rozważania dla zestawu trzech par źródło-detektory. Rysunek 7 przedstawia wartości  $k_i$  dla 16 oraz 64 promieni i trzech wiązek. Natomiast rysunek 7b przedstawia analogicznie do rysunku 6a sumę pól promieni, ale dla trzech wiązek.



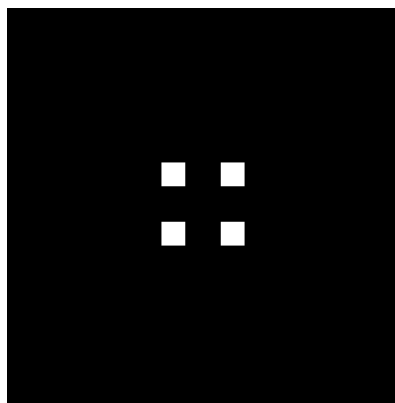
Rys. 7. Pokrycie trzech wiązek światła przechodzących przez rurę dla:  
a) 16 promieni; b) 64 promieni

### 3. Procedura testowa

Procedura testowa polegała na zadaniu obrazu wejściowego rozkładu materiału w obszarze pomiarowym, a następnie przeprowadzeniu procesu rekonstrukcji z użyciem map czułości opisanych w rozdziale 2 niniejszego artykułu. Rysunek 8 przedstawia obraz wejściowy (fantom), w którego przestrzeni pomiarowej umieszczono cztery obiekty, będące w przekroju kwadratami. Takie dobranie obiektu wg autorów umożliwi wiarygodne przetestowanie algorytmu rekonstrukcji. Obiekty te posiadają ostre wierzchołki i wyraźne krawędzie. Pierwsza z tych cech powinna stanowić dodatkowe utrudnienie dla algorytmu rekonstrukcji. Natomiast druga cecha jest szczególnie istotna z punktu dokonywania pomiarów przepływów dwufazowych typu gaz-ciecz. W realnych przepływach mamy do czynienia z kształtami zaokrąglonymi (pęcherze gazu najczęściej formują się w elipsoidy o różnym rozmiarze). W tego rodzaju przypadkach obiekty powinny być lepiej zidentyfikowane za pomocą opisywanych map czułości. Oznacza to, że jeżeli rekonstrukcja fantomów o kwadratowych przekrojach da zadowalające rezultaty, to będzie można wyciągnąć wniosek, że w przypadku pęcherzy gazu lub innych, podobnych struktur, także powinna dać dobre rezultaty.

Umieszczenie fantomu w centralnym obszarze także jest nieprzypadkowe, jako że budowany system ma za zadanie współpracować z tomografem optycznym, którego właśnie w części centralnej cechuje najmniejsza czułość. Dla tak przygotowanego fantomu wyznaczono wektor sygnałów na detektorach traktowanych na etapie rekonstrukcji jako dane pomiarowe. Przeprowadzono wspomnianą procedurę rekonstrukcji obrazu metodą macie-

rzową (opisana w [1]) zarówno dla realnych ustawień systemu tomograficznego, składającego się z pięciu płaszczyzn i 64 detektorów na każdej z nich, jaki i dla wygenerowanego podczas symulacji układu 32 płaszczyzn i 32 detektorów przypadających na każdą z nich. Testowanie takich dwóch konfiguracji miało za zadanie dać cząstkową odpowiedź na pytanie o optymalny dobór liczby źródeł i detektorów. Z drugiej strony, autorzy nie spodziewali się na podstawie wyników przedstawionego porównania symulacyjnego wygenerowania jednoznacznej odpowiedzi na tak postawione pytanie, jako że oprócz wyników rekonstrukcji w grę wchodzi także stopień skomplikowania systemu, jego rozmiary, możliwości akwizycji danych i obliczeniowe sprzętu, koszt rozwiązań itp.



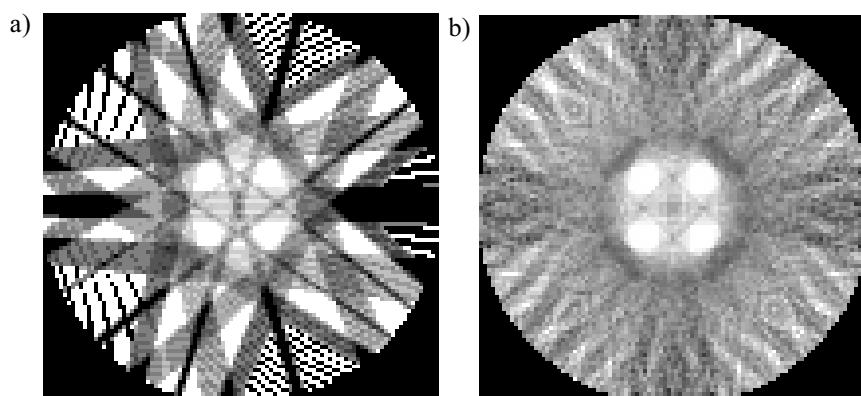
Rys. 8. Obraz zadanego rozkładu testowego w przestrzeni pomiarowej

#### 4. Przykłady rekonstrukcji

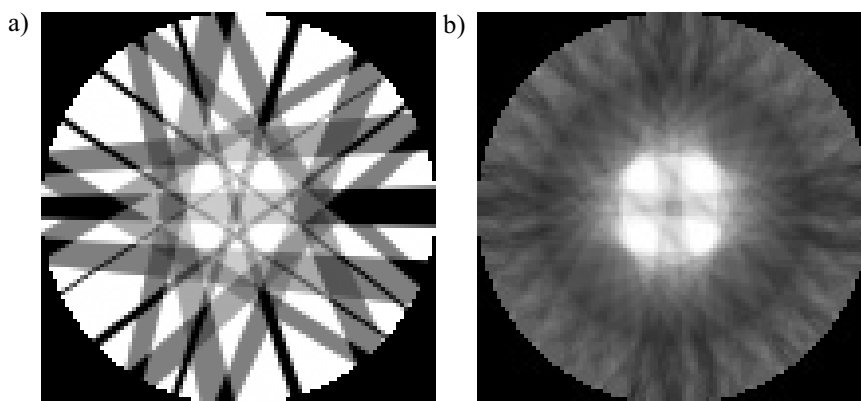
Rysunek 9 pokazuje wyniki zrekonstruowanego obrazu, dla różnej liczby źródeł i detektorów. Wykorzystano w nich pierwszą z opisywanych metod wyznaczenia macierzy czułości rozważając promień jako odcinek przechodzący przez poszczególne piksele obrazu. Wyniki te można porównać z obrazami uzyskanymi za pomocą drugiej macierzy czułości uwzględniającej szerokość wiązki światła przy przejściu przez poszczególne piksele siatki obrazu (rys. 10). Jak widać na rysunkach, porównanie tych dwóch metod wypada na korzyść metody uwzględniającej szerokość wiązki. Druga istotna cecha, jaka wynika z porównania, tym razem różnych liczb użytych czujników, pokazuje lepsze odwzorowanie obszaru pomiarowego dla systemu z większą liczbą czujników przy mniejszej liczbie detektorów przypadających na jeden czujnik.

W przypadku istniejącego systemu tomografu optycznego ( $5 \times 64$ ) droga promieni światła pomiędzy źródłem a detektorem jest najlepiej iluminowana w centralnej części rury. Znacznie gorzej sytuacja wygląda przy ścianach rury (z tego właśnie powodu widoczne są na rysunkach artefakty). Stosunkowo niedokładna wizualizacja obrzeży obniża przydatność systemu optycznego do badań niektórych reżimów przepływu dwufazowego. Jednakże, w zależności od zastosowania, ta cecha nie musi stanowić wady. W opracowanym syste-

mie badawczym do przepływów wielofazowych zadaniem dla tomografu optycznego przewidziane jest dokładne wizualizowanie właśnie części centralnej szklanej rury. Natomiast za wizualizację części obszaru przyległego do ścian rury w kompletnym, dualnym systemie pomiarowym, odpowiadać ma tomograf pojemnościowy ulokowany poniżej tomografu optycznego [3]. Rozpatrując w tym kontekście porównanie dokładności obrazowania obszaru centralnego rury dla obydwu ustawień konfiguracji czujniki/detektory, można uznać, że prototypowy system prezentuje wystarczający poziom jakości wizualizacji.



Rys. 9. Wynik po przeprowadzeniu rekonstrukcji metodą pierwszą:  
a) 5 wiązek, 64 detektory; b) 32 wiązki, 32 detektory

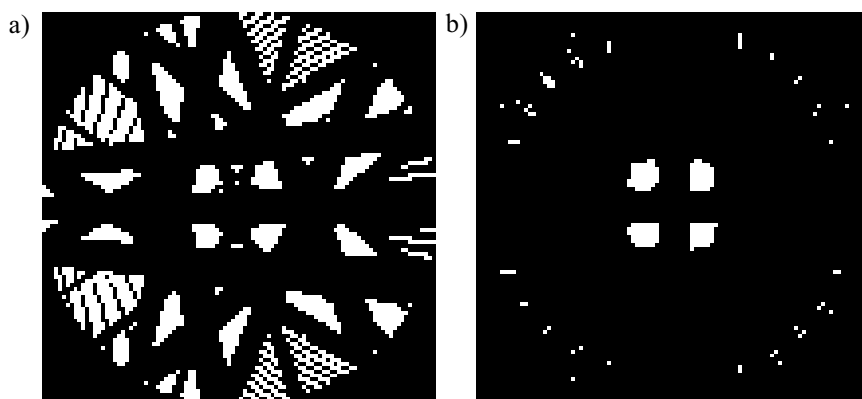


Rys. 10. Wynik po przeprowadzeniu rekonstrukcji metodą drugą:  
a) 5 wiązek, 64 detektory; b) 32 wiązki, 32 detektory

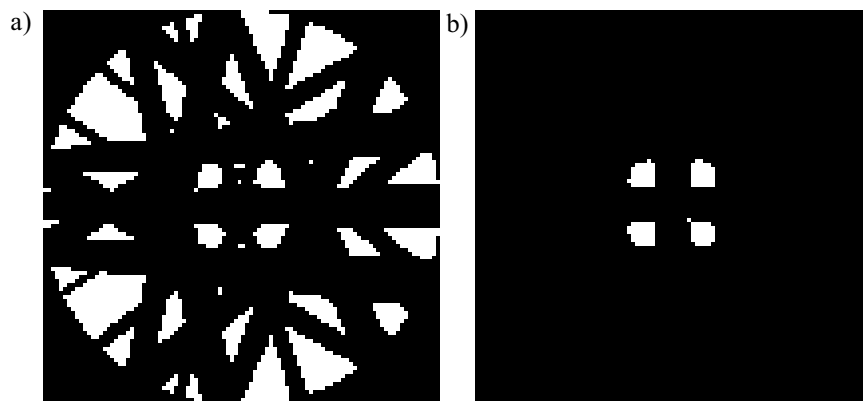
Wyniki prezentowane na rysunkach 9 i 10 zawierają artefakty, które wydają się być łatwe do skorygowania. W związku z tym autorzy proponują w celu poprawy jakości zastosowanie, dla obydwu przypadków, prostą operację progowania zgodnie z zależnością

$$p_n = \begin{cases} 1, & p \geq 0,5, \\ 0, & p < 0,5. \end{cases}$$

Na rysunkach 11 i 12 pokazane zostały rezultaty progowania dla rozważanych konfiguracji tomografu oraz dwóch różnych metod wyznaczania macierzy czułości.



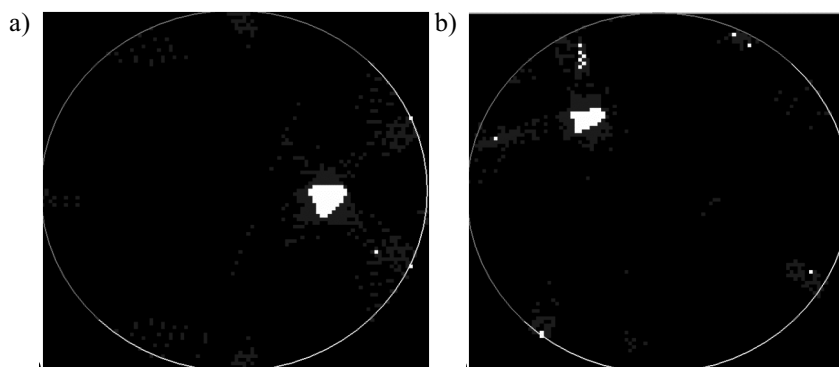
**Rys. 11.** Wynik po zastosowaniu progowania (metoda pierwsza):  
a) 5 wiązek, 64 detektory; b) 32 wiązki, 32 detektory



**Rys. 12.** Wynik po zastosowaniu progowania (metoda pierwsza):  
a) 5 wiązek, 64 detektory; b) 32 wiązki, 32 detektory

Niejako dla porównania, na rysunku 13 zamieszczono wyniki rekonstrukcji dla obiektów okrągłych (bardziej zbliżonych do pęcherzy gazu). Obiekty miały średnicę około osiem razy mniejszą od średnicy rury i umieszczane były w odległości 2–3 długości średnic od ścian rury, w różnych położeniach w stosunku do źródeł światła i detektorów. Także i w tym przypadku możliwe jest oczywiście zastosowanie progowania.

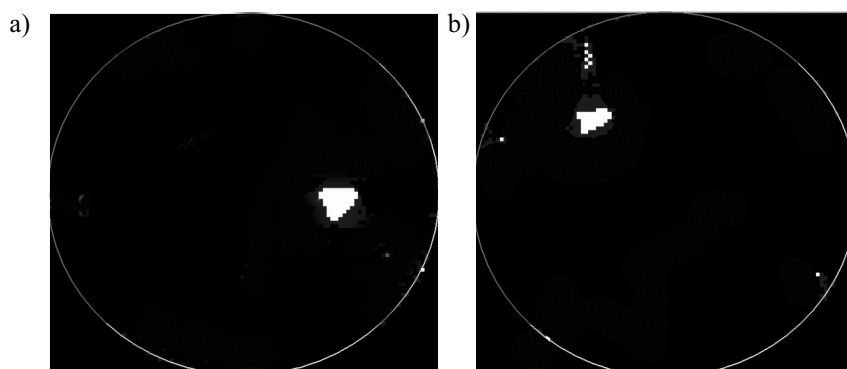




**Rys. 13.** Wynik po przeprowadzeniu rekonstrukcji dla obiektów okrągłych umiejscowionych w pobliżu: a) pierwszego panelu detektorów; b) trzeciego panelu detektorów.

W obydwu przypadkach konfiguracja sprzętu taka sama: 5 wiązek i 64 detektory na panel

Rysunek 14 przedstawia efekt działania algorytmu progującego dla tych samych obrazów, co na rysunku 13.



**Rys. 14.** Wynik po przeprowadzeniu rekonstrukcji oraz progowaniu dla obiektów okrągłych umiejscowionych w pobliżu: a) pierwszego panelu detektorów; b) trzeciego panelu detektorów.

W obydwu przypadkach konfiguracja sprzętu taka sama: 5 wiązek i 64 detektory na panel

## 5. Wnioski

W artykule przedstawione są dwie metody wyznaczania macierzy czułości dla tomografii optycznej wraz z porównaniem wyników rekonstrukcji uzyskanej przy ich zastosowaniu. Pierwsza zakłada, że światło docierające do detektora jest pojedynczym promieniem. Druga natomiast przyjmuje, że promienie są wiązkami o określonej szerokości. Obie metody opierają się na śledzeniu promieni od źródła do czujnika. Porównanie wynikowych obrazów wskazuje, że użyty system tomograficzny najlepiej wizualizuje obiekty znajdujące

się w centralnej części przestrzeni pomiarowej. Rozszerzenie tego zakresu prawdopodobnie mogłoby zostać uzyskane poprzez zwiększenie kąta padania wiązki od źródła od detektorów, czy też przy zwiększeniu ilości detektorów i wydłużeniu paneli detekcyjnych, co wskazuje przyszłe kierunki rozwoju sprzętu. Z drugiej jednak strony, jeśli rozpatrzmy opisywany tomograf optyczny jako część dualnego systemu pomiarowego pracującego w parze z tomografem pojemnościowym, to zauważymy, że te dwa urządzenia idealnie się uzupełniają. Chodzi o to, że tomograf pojemnościowy dobrze oddaje obszar blisko krawędzi rurociągu, jako że właśnie blisko elektrod pomiarowych ma największą czułość.

*Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2005/2006 jako projekt badawczy 3 T10C 014 28.*

### **Literatura**

- [1] Rząsa M.R., Grudzień K., Romanowski A., Wajman R.: *Optyczny tomograf procesowy składający się z pięciu projekcji*. Seminarium analizy i przetwarzania sygnałów w systemach wizji i sterowania, Słok k. Bełchatowa 2007
- [2] Rząsa M.R., Grudzień K., Romanowski A., Wajman R.: *The Discrete Optical Tomograph including Five Projections*. [w:] Proceedings of 5th World Congress on Industrial Process Tomography, Bergen, Norway, 2007
- [3] Rząsa M.R., Wajman R., Grudzień K., Romanowski A.: *The capacitive tomograph of higher sensitivity near the sensor wall*. [w:] Proceedings of 5th World Congress on Industrial Process Tomography, Bergen, Norway, 2007
- [4] Rząsa M.R., Plaskowski A.: *Application of Optical Tomography for Measurement of Small Gas Flows*. 3rd World Congress on Industrial Process Tomography, Banff, Canada, 2003, 324–330
- [5] Williams R.A., Beck M.S.: *Process Tomography: Principles, Techniques and Applications*. Oxford, Butterworth-Heinemann 1995, 581