

Nowa metoda wizualizacji zmian objętościowych podczas przepływu silosowego na podstawie pomiarów z zastosowaniem promieniowania rentgenowskiego. Część I

Dr hab. inż. Maciej Niedostatkiwicz, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Budownictwa i Inżynierii Materiałowej, Politechnika Gdańska

1. Wprowadzenie

Podczas opróżniania silosów rozróżnia się następujące rodzaje przepływu materiału sypkiego [37]:

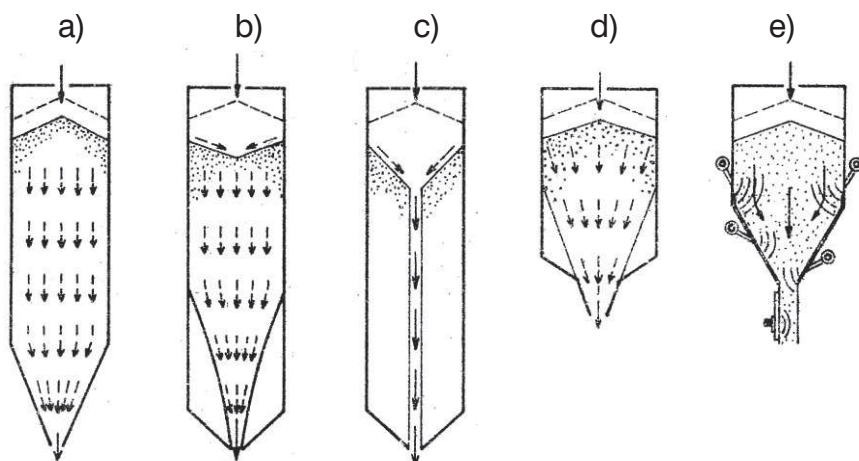
- masowy,
- rdzeniowy kominowy,
- rdzeniowy tunelowy,
- rozszerzony oraz
- zespolony (rys. 1).

Podczas przepływu masowego w materiale sypkim nie tworzą się tzw. strefy martwe (obszary pozostającego w spoczynku materiału), a wszystkie ziarna przemieszczają się w dół ze zbliżoną prędkością. Podczas przepływu rdzeniowego w materiale sypkim tworzy się strefa ruchu (kanał przepływu). Ten rodzaj przepływu można podzielić na przepływ kominowy i tunelowy w zależności od położenia granic kanału przepływu. Przepływ rozszerzony stanowi połączenie przepływu masowego i rdzeniowego. Najczęściej w silosach dolna część lejka

jest pochylona i wystarczająco gładka, aby wytworzył się przepływ masowy, natomiast w górnej części silosu wytwarza się kanał przepływu o charakterze rdzeniowym. Przepływ zespolony powstaje w silosach z przepływem masowym i rdzeniowym oraz dodatkowymi urządzeniami wspomagającymi wyptyw.

W praktyce, niezależnie od rodzaju przepływu, każdy z silosów charakteryzuje się utrudnieniami eksploatacyjnymi, których zakres występowania zależy od konstrukcji silosu, w tym podatności jego ścian, rodzaju składowanego materiału oraz sposobu opróżniania [6]. Utrudnienia te powodują straty ekonomiczne oraz obniżają jakość wytwarzanego w procesie technologicznym bądź składowanego w silosie materiału sypkiego [49, 96, 46].

Znalezienie współzależności pomiędzy zmianami objętościowymi zachodzącymi w materiale sypkim podczas opróżniania silosu i związanymi z nimi lokalizacjami odkształceń występującymi w materiale sypkim wymaga



Rys. 1.

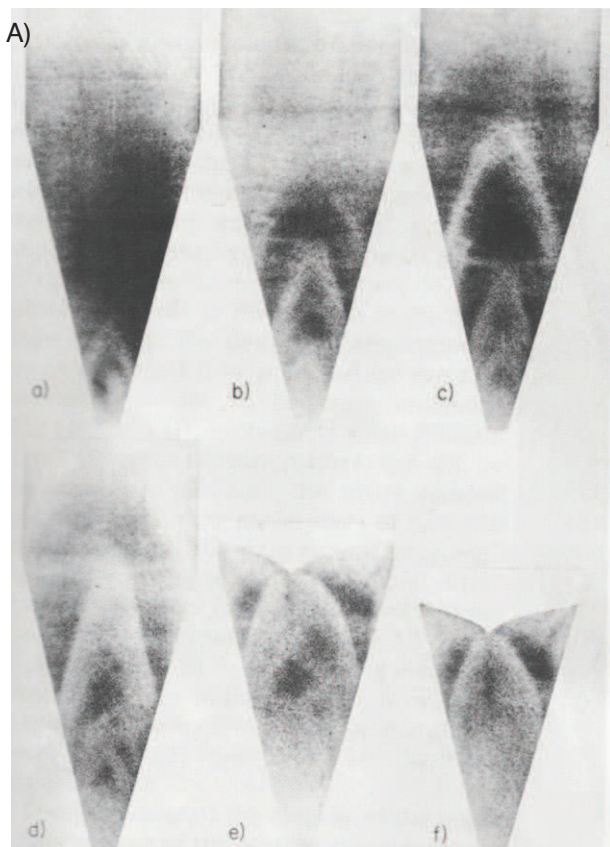
Rodzaje przepływu materiału sypkiego w silosach:
a) masowy,
b) rdzeniowy kominowy,
c) rdzeniowy tunelowy,
d) rozszerzony,
e) zespolony
[Kobiela 1990]

stosowania metod pomiarowo-diagnostycznych, które nie zaburzają przepływu materiału. Warunek ten spełniają metody bezinwazyjne, spośród których do najbardziej znanych należą: metoda RTG (promieniowanie rentgenowskie znane też pod nazwą promieniowanie X) [57, 45, 25, 7, 32, 33, 22, 55], promieniowanie gamma [14], tomografia rentgenowska [3, 34, 2], metoda *Electrical Capacitance Tomography* (ECT) [26, 31] oraz metoda *Particle Image Velocimetry* (PIV) [59, 60, 61, 56, 41, 28, 24, 9, 10, 12, 13, 38, 39, 40, 50, 51, 52].

Celem artykułu jest przedstawienie wyników pomiarów wykonanych w modelu silosu z przepływem kominowym zrealizowanych z zastosowaniem promieniowania rentgenowskiego. W ramach badań przeprowadzono studia parametryczne uwzględniając wpływ zagęszczenia początkowego oraz sposób opróżniania silosu. W pracy omówiono metodologię pomiarów prowadzonych z zastosowaniem tomografu rentgenowskiego. Ze względu na obszerność materiału artykuł podzielony został na 2 części – w pierwszej opisano podstawy teoretyczne pomiarów przepływów silosowych z zastosowaniem metod radiacyjnych, w drugiej zaprezentowano przy zastosowaniu różnych technik wizualizacyjnych uzyskane wyniki doświadczeń.

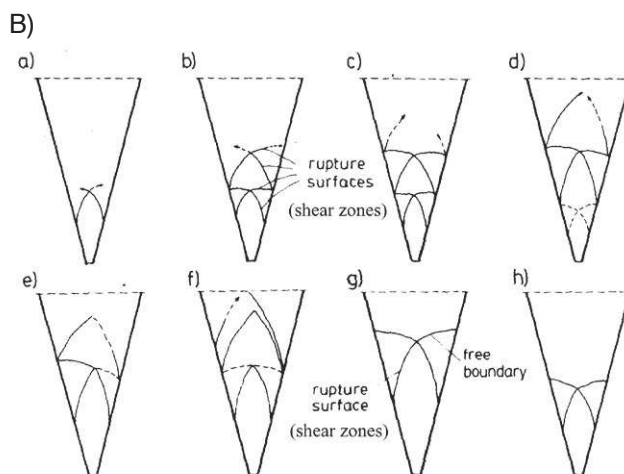
2. Zastosowanie promieniowania rentgenowskiego w analizie przepływu silosowego

Na rysunkach 2–4 przedstawiono radiografy przepływu silosowego uzyskane podczas doświadczeń

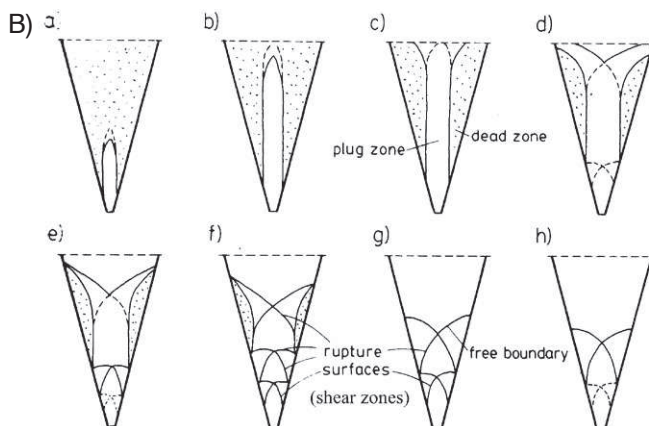
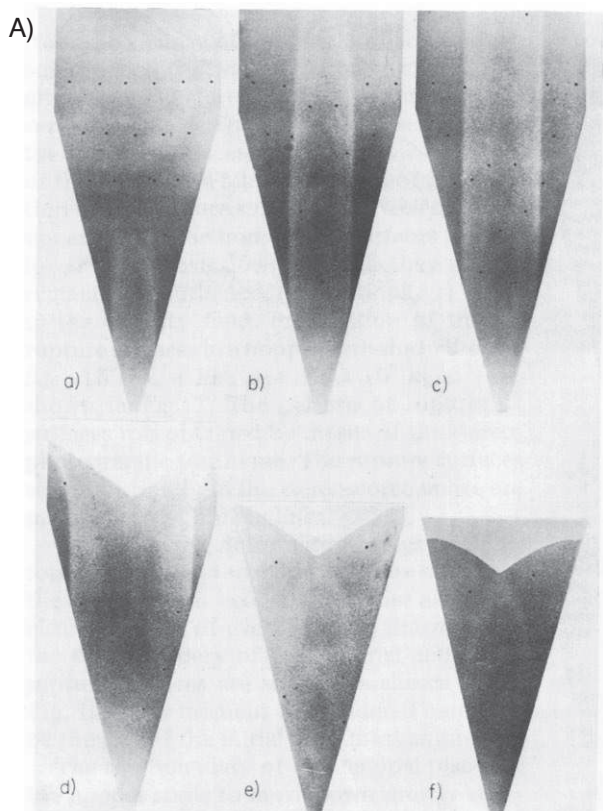


przeprowadzonych przez Michalowskiego [32, 33] oraz Baxtera i Behringera [3] z piaskiem w stanie zagęszczonym. Podczas doświadczeń w silosie z przepływem masowym Michalowski [32, 33] uzyskał prawie symetryczne lokalizacje w postaci łukowatych stref dylatacji materiału sypkiego, które pojawiły się bezpośrednio nad otworem wylotowym w chwili rozpoczęcia opróżniania silosu (rys. 2). Lokalizacje propagowały do góry poprzez materiał sypki, krzyżując się wzajemnie wzdłuż osi symetrii silosu, docierały do ścian leja i odbijały się od nich. Proces ten powtarzał się aż do chwili, gdy lokalizacje dotarły do punktu przejścia części równoległościennej silosu w lej. W części równoległościennej silosu nie zaobserwowano pojawienia się łukowatych lokalizacji. Podobne wyniki uzyskał Niedostatkiwicz [37] podczas doświadczeń z zastosowaniem promieniowania rentgenowskiego w silosie z przepływem masowym. Podczas doświadczeń wykonanych przez Michalowskiego [32, 33] w silosie z przepływem kominowym łukowate lokalizacje były widoczne w kanale przepływu (rys. 3). Propagacja lokalizacji ku górze nie była tak symetryczna jak w silosie z przepływem masowym, jedynie część lokalizacji odbijała się od ścian kanału przepływu, przenikając się i krzyżując wzajemnie. Sytuacja ta występowała głównie w czasie doświadczeń ze ścianami bardzo szorstkimi. Wyniki uzyskane przez Niedostatkiwicza [37] podczas badań w silosie z przepływem kominowym wykazywały zgodność ilościową w porównaniu do badań Michalowskiego [32, 33]. Baxter i Behringer [3] uzyskali lokalizacje o przebiegu zbliżonym do otrzymanych przez Michalowskiego [32, 33] i Niedostatkiwicza [37] w silosie z przepływem kominowym.

Udoskonaloną wersją pomiarów z zastosowaniem promieniowania rentgenowskiego są pomiary z użyciem tomografii rentgenowskiej, w której ekspozycja promieniowania ma charakter ciągły. Teoretyczną analizę mechanizmu pomiaru z zastosowaniem tomografii



Rys. 2. Przepływ masowy w silosie: A) radiografy, B) schemat przepływu dla różnych chwil czasowych (a-h) [Michalowski 1984]



Rys. 4.
Radiografy
przepływu kominowego
w leju
[Baxter
i Behringer 1990]

rentgenowskiej przedstawili w pracy Lytvyn i in. [30]. Dotychczas tomografii rentgenowskiej nie stosowano powszechnie do analizy przepływów silosowych, była ona wykorzystywana głównie na potrzeby laboratoryjne w analizie przepływów układu dwufazowego cieczy-powietrze [12, 43]. Analizę możliwości zastosowania tomografii rentgenowskiej w badaniu przepływu materiału sypkich zamieścili Moreno-Atanasio i in. [35] oraz Shi i in. [48], West i in. [58], Williams i Jia [62] oraz Richard i innych [44]. Dyskusję na temat aplikacji tomografii rentgenowskiej do monitoringu przepływu materiału sypkiego w małym zbiorniku cylindrycznym przedstawiono w pracy Suzuki i in. [54], natomiast wstępne wyniki analizy

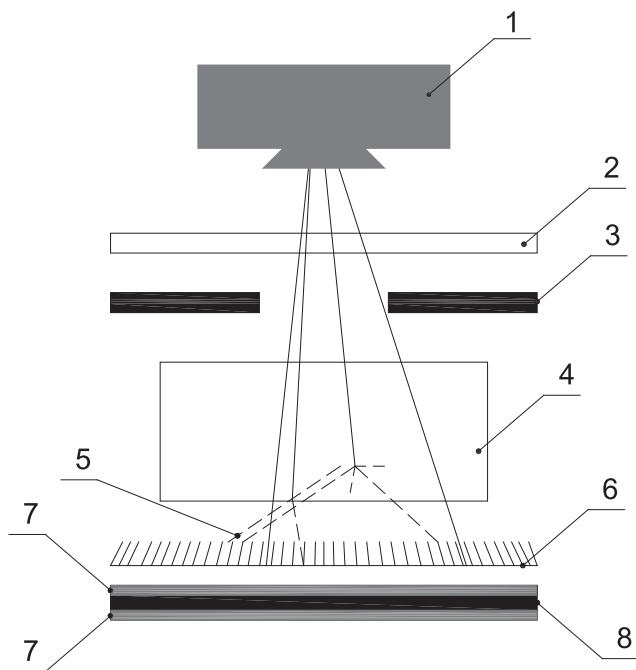
Rys. 3. Przepływ kominowy w silosie: A) radiografy, B) schemat przepływu dla różnych chwil czasowych (a-h) [Michalowski 1984]

przepływu materiału sypkiego w prostokątnych silosach laboratoryjnych przedstawiono w pracach Grudnia [15] oraz Grudnia i in. [16, 17, 18, 19, 20, 21].

3. Opis metody pomiarowej

Metoda RTG zaliczana jest do radiografii konwencjonalnej będącej metodą obrazowania, w której wymagana jest ekspozycja analizowanej próbki na promieniowanie rentgenowskie (promieniowanie X). Otrzymywany obraz jest cieniem próbki, która pochłania częściowo lub całkowicie promieniowanie generowane przez lampę RTG. Obraz uzyskiwany jest za pomocą kliszy fotoczułej, cyfrowej płyty obrazującej lub metody fluoroskopowej. Otrzymywany obraz jest negatywem obiektu, to znaczy obszary białe (mniej zaciemnione) odpowiadają obszarom struktury próbki, które bardziej od pozostałych pochłaniają promieniowanie. Tego rodzaju sposób obrazowania stosuje się powszechnie zarówno w medycynie, jak i w wielu pracach badawczych z wykorzystaniem materiałów sypkich. W mechanice ośrodków sypkich bardzo często spotyka się wyniki eksperymentów obrazowanych jako pozytywy, to znaczy fragmenty próbek charakteryzujące się mniejszym zagęszczeniem, przez które przedostaje się promieniowanie, są wizualizowane jako elementy jaśniejsze, natomiast fragmenty charakteryzujące się podwyższonym zagęszczeniem widoczne są jako ciemniejsze.

Podstawowymi elementami aparatu rentgenowskiego są: generator wysokiego napięcia i lampa rentgenowska, filtr zewnętrzny, kolimator, przesłona przeciwrozproszeniowa oraz kasetta (klisza) (rys. 5). Generator wysokiego napięcia wytwarza energię potrzebną do uwolnienia elektronów z lampy rentgenowskiej w celu rozpoczęcia procesu ekspozycji. Filtr zewnętrzny należy do grupy urządzeń mających za zadanie ograniczyć promieniowanie. Jest to urządzenie służące do zmiany widma promieniowania rentgenowskiego przez zastosowanie ośrodka pochłaniającego. Opuszczająca lampę rentgenowską



Rys. 5. Schemat aparatu rentgenowskiego: 1 – lampa rentgenowska, 2 – filtr zewnętrzny, 3 – kolimator, 4 – próbka, 5 – promieniowanie rozproszone, 6 – kratka przeciwrozproszeniowa, 7 – ekran, 8 – matryca

Wiązka promieniowania zawiera promienie o różnych długościach fal, tzw. widmo. Stosowanie filtra jest konieczne w celu eliminacji promieniowania miękkiego (o dużej długości fali), które ma zbyt małą energię i zostaje pochłonięte jedynie przez powierzchniowe warstwy próbki. Kolimator, będący podobnie jak filtr zewnętrzny urządzeniem ograniczającym promieniowanie, jest elementem, który ma nadać odpowiedni dla danego zastosowania kształt wiązki promieniowania. Przesłona przeciwrozproszeniowa (*kratka Bucky'ego*) stosowana jest w celu zmniejszenia wpływu promieniowania rozproszonego na pogorszenie jakości obrazu, ponieważ promieniowanie rentgenowskie, przenikając przez próbkę, zostaje w niej nierównomiernie pochłonięte.

Dobór parametrów ekspozycji zależy od rodzaju badań i charakteru próbki. Do podstawowych parametrów charakteryzujących promieniowanie X wiązki pierwotnej należą:

- a) natężenie,
- b) twardość,
- c) dawka,
- d) widmo,
- e) nierównomierność promieniowania
- f) rozmiar,
- g) jednorodność
- h) geometria wiązki.

Na jakość, rozumianą jako czytelność obrazu, a tym samym na parametry wiązki pierwotnej promieniowania X wpływają następujące wielkości:

1) wartość natężenia prądu generatora [mA] (wpływ na a),

2) wartość napięcia prądu generatora [kV] (wpływ na a, b),

3) czas ekspozycji [s] (wpływ na c),

4) grubość filtra zewnętrznego [mm] (wpływ na d, e),

5) szerokość kolimacji wiązki [mm] (wpływ na f),

6) rozproszenie wiązki [-] (wpływ na g),

7) ogniskowa promieniowania [m] (wpływ na h) [37].

Do detekcji promieniowania stosuje się ekrany luminescencyjne emitujące światło w odpowiedzi na promieniowanie X (luminescencja fotostymulowana). Jedną z metod radiologicznych, w których to zjawisko się wykorzystuje, jest radiografia fosforowa. Zamiast kliszy technika ta wykorzystuje fotoczułe ekrany fosforowe jako receptory (detektory) obrazu z dodatkową napyloną warstwą luminoforu. Odtwarzany z ekranu fosforowego za pomocą skolimowanej wiązki laserowej obraz poddawany jest następnie obróbce cyfrowej. Wielkość ekranu fosforowego determinuje wielkość matrycy obrazu poddawanej obróbce. Rozmiar matrycy opisuje liczba elementów obrazu (pikseli) w kierunku poziomym i pionowym. Wielkość pikseli zawarta jest w przedziale od 0,1–0,2 mm w większości cyfrowych systemów radiologicznych umożliwiających późniejszą obróbkę danych. Rozmiar pikseli bezpośrednio determinuje rozdzielczość przestrzenną definiowaną jako możliwość rozróżnienia liczby linii rozmieszczonych równolegle na długości 1 mm.

Doskonalszą formą aparatu rentgenowskiego jest tomograf rentgenowski, w którym ekspozycja promieniowania może być wykonywana w sposób ciągły. Tomograf rentgenowski umożliwia zarówno wykonywanie pojedynczych radiografów (klasyczna radiografia), jak i zapis obrazów rentgenowskich w sposób kontynuacyjny (tomografia rentgenowska) – w takim wypadku ze względu na możliwość rotacji próbki możliwa jest przestrzenna (3D) wizualizacja struktury materiału [15].

W tomografii rentgenowskiej dobór położenia próbki pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem promieniowania jest jednym z kluczowych czynników wpływających na jakość pomiaru [12, 29]. Położenie próbki zależy od jej rozmiaru i oczekiwanego powiększenia. Jeżeli spodziewane jest duże powiększenie, próbka powinna być umiejscowiona blisko nadajnika (źródła) promieniowania rentgenowskiego, jeżeli natomiast mniejsze, to powinna być usytuowana bliżej odbiornika w celu przeprowadzenia detekcji jej całej powierzchni w czasie ekspozycji promieniowania. Istotnymi parametrami wpływającymi na jakość pomiaru są właściwy dobór wartości natężenia I_g oraz wartości napięcia U_g prądu nadajnika [8]. Dobór tych parametrów zależy od grubości próbki i porowatości materiału decydujących o pochłanianości promieniowania. Kolejnym istotnym zagadnieniem jest twardość promieniowania i dobór odpowiedniego filtra zewnętrznego [53] w celu eliminacji promieniowania miękkiego (o dużej długości fali), które ma zbyt małą energię i zostaje pochłonięte jedynie przez powierzchniowe warstwy próbki. Brak eliminacji promieniowania miękkiego wpływa na powstawanie błędów w postaci cieniowania obrazu (powstawanie artefaktów) [42].

Przed przystąpieniem do pomiarów niezbędne jest ustalenie zależności pomiędzy czasem pojedynczej ekspozycji a liczbą realizowanych zdjęć w czasie pomiaru ciągłego [23]. Kolejnym etapem przygotowania pomiaru jest autokalibracja aparatury pomiarowej [5]. Podobnie jak brak filtra zewnętrznego, brak odpowiednio przeprowadzonej kalibracji aparatury pomiarowej przyczynia się również do powstawania artefaktów. Kalibracja aparatury polega na wygenerowaniu dwóch impulsów promieniowania (pojedynczych ekspozycji). Jeśli wynikiem pomiarów ma być uzyskanie klasycznych radiogramów, podczas kalibracji pomiędzy źródłem promieniowania a odbiornikiem nie jest ustawiona próbka poddana naświetlaniu. Pierwszy z sygnałów generowany jest z zastosowaniem pełnej mocy promieniowania rentgenowskiego możliwego do uzyskania w czasie pomiarów, drugi z zastosowaniem promieniowania w poziomie $\approx 50\%$. Te dwa pomiary wykonane po sobie umożliwiają normalizację intensywności jasności odczytywanej przez odbiornik. Podczas kalibracji aparatury przewidzianej do pomiarów trójwymiarowych (tomografia rentgenowska) konieczne jest umiejscowienie próbki pomiędzy źródłem promieniowania a odbiornikiem i jej rotacja w czasie ekspozycji promieniowania kalibracyjnego. Procedura kalibracyjna jest zautomatyzowana, zarówno w zakresie doboru mocy promieniowania kalibracyjnego, jak i doboru czasu pomiędzy poszczególnymi ekspozycjami.

Uzyskane w czasie pomiarów radiografy zawierają informacje dotyczące wielkości redukcji intensywności promieniowania X wewnątrz próbki. W wyniku projekcji na powierzchni odbiornika powstaje obraz 2D współczynnika osłabienia (pochłaniania) μ . Wartość współczynnika odzwierciedla absorpcję promieniowania rentgenowskiego wywołaną obecnością próbki pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem. Współczynnik osłabienia teoretycznie przyjmuje w wypadku ścian silosu stałą wartość, jednakową dla różnych poziomów opróżnienia zasobnika. Do ilościowego opisu zmian koncentracji materiału sypkiego w silosie niezbędne jest jednak wykonanie porównania wartości współczynnika osłabienia dla różnych fragmentów ścian w celu eliminacji wpływu ściany silosu na wielkość pochłaniania promieniowania rentgenowskiego oraz dodatkowo w celu możliwości skalowania odbiorników promieniowania (od wartości określonych oddzielenie dla każdego piksela do wartości z przedziału (0–1)).

Na podstawie danych otrzymanych z płyty odbiornika minimalna intensywność jasności I_{min} (maksymalne pochłanianie μ_{max}) dla każdego z pikseli obliczana jest wartością średnią uzyskaną na podstawie pomiarów materiału sypkiego w silosie od chwili rozpoczęcia rejestracji radiografów, gdy materiał sypki zalega w silosie:

$$I_{min}(x, y) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k I(x, y) \quad (1)$$

gdzie:

k – liczba zdjęć poddawanych analizie,
 I – wartość rozkładu intensywności jasności promieniowania rentgenowskiego na powierzchni odbiornika,
 (x, y) – położenie wybranego piksela na powierzchni odbiornika.

Jeśli silos nie jest opróżniany, mieszanina materiału sypkiego oraz powietrza wypełniającego pory i kapilary jest stała. W wypadku maksymalnej intensywności jasności I_{max} (minimalny poziom pochłaniania μ_{min}) jako próbka służy pusty model silosu bez wypełnienia materiałem sypkim:

$$I_{max}(x, y) = \frac{1}{k} \sum_{i=n-k}^n I(x, y) \quad (2)$$

gdzie:

k – numer ostatniego zdjęcia poddanego analizie,
 n – całkowita liczba zdjęć użytych w czasie badań.
 Opierając się na wyznaczonych wartościach minimalnej oraz maksymalnej jasności promieniowania, przeprowadza się procedurę normalizacyjną:

$$I' = \frac{I_{detector} - I_{max}}{I_{min} - I_{max}} \quad (3)$$

gdzie:

$I_{detector}$ – intensywność jasności promieniowania rentgenowskiego uzyskana na powierzchni odbiornika.

Wprowadzony nowy, znormalizowany zakres intensywności jasności I' jest określony w przedziale (0–1), gdzie 0 oznacza minimalną wartość współczynnika absorpcji (minimalna koncentracja piasku – silos pusty), a 1 oznacza maksymalną wartość współczynnika absorpcji (maksymalna koncentracja piasku – silos wypełniony). Zmiany intensywności jasności I' określane w przedziale (0–1) obrazują zmianę współczynnika absorpcji promieniowania rentgenowskiego w zależności od koncentracji materiału sypkiego. Zmniejszenie intensywności jasności I' oznacza zmniejszenie współczynnika pochłaniania promieniowania rentgenowskiego (dylatacja materiału sypkiego), natomiast wzrost intensywności jasności I' oznacza wzrost współczynnika pochłaniania (kontrakcja materiału sypkiego).

Dane uzyskane na podstawie pomiarów z zastosowaniem tomografu rentgenowskiego mogą być przedstawiane w sposób zróżnicowany [27]. Możliwe jest przedstawienie rozkładu koncentracji materiału w funkcji jasności w postaci zarówno wykresów 1D, jak i zdjęć 2D. W wypadku stosowania tomografii rentgenowskiej możliwa jest również rekonstrukcja 3D struktury materiału. Podczas prezentacji zmian koncentracji w postaci wykresów 1D jako funkcji intensywności jasności I' uzyskiwane wartości są uśredniane poprzez stosowanie filtrów, a jednym z najczęściej stosowanych filtrów jest filtr medianowy [37].

Na podstawie wyników badań przeprowadzonych przez Buffiere'a i in. [8] założono, że logarymiczna zależność tłumienia promieniowania rentgenowskiego wizualizowana jako znormalizowana intensywność jasności I'

pozostaje w zależności liniowej ze zmianą koncentracji materiału w silosie podczas jego opróżniania. Wyniki badań nad zagadnieniem tłumienia promieniowania rentgenowskiego w funkcji zmian intensywności jasności I' przedstawili również Grudzień i in. [21]. Prace Selomulya i in. [47] oraz Nakashima i Watanabe [36] potwierdziły liniową zależność pomiędzy zmianą intensywności promieniowania rentgenowskiego a zagęszczeniem materiału sypkiego. W pracy Caulkina i in. [11] przedstawiono próbę opisu zamiany porowatości na wysokości badanej próbki, przy czym w pierwszej z prac zaprezentowano wyniki korelacji intensywności promieniowania i porowatości w zbiorniku cylindrycznym. Zagadnienie wpływu niejednorodności próbki na rozkład porowatości na podstawie analizy promieniowania rentgenowskiego przedstawiono w pracy Al-Raousha [1].

4. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono w modelu silosu z przepływem kominowym. Wymiary silosu wynosiły odpowiednio $h=0,29$ m (wysokość), $b=0,15$ m (szerokość), $d=0,07$ m (głębokość), grubość ścian modelu $t = 0,008$ m. Opróżnianie silosu odbywało się grawitacyjnie oraz w sposób kontrolowany. W przypadku opróżniania grawitacyjnego wypływ odbywał się przez otwór listwowy o szerokości $s = 0,0005$ m wykonany na całej głębokości modelu, prostopadle do szerszej ściany modeli. W przypadku wypływu kontrolowanego opróżnianie odbywało się poprzez otwór listwowy do zbiornika (zasobnika) poniżej silosu, który miał w dolnej części otwór prostokątny o wymiarach $0,008 \times 0,022$ mm.

Zarówno dla wypływu grawitacyjnego, jak i dla wypływu kontrolowanego doświadczenia przeprowadzono dla materiału sypkiego w stanie luźnym oraz zagęszczonym. Doświadczenia przeprowadzono z kwarcowym piaskiem średnioziarnistym ze średnią średnicą ziarna $d_{50} = 0,8$ mm. Materiał w stanie luźnym ($\gamma = 14,32$ kN/m³, $e_o = 0,85$) uzyskano poprzez napełnianie przez rurę ustawioną bezpośrednio nad materiałem sypkim, podnoszoną sukcesywnie w miarę napełniania modelu. Materiał w stanie zagęszczonym uzyskano, stosując napełnianie metodą deszczu rozproszonego (przez sito umieszczone na stałe na górze silosu) ($\gamma = 17,0$ kN/m³, $e_o = 0,56$). Podwyższenie szorstkości ścian w części równoległej silosu oraz w leju uzyskano poprzez wyklejenie papierem ściernym. Różnice w zagęszczeniu początkowym dla piasku w stanie luźnym i zagęszczonym podczas poszczególnych serii pomiarowych nie przekraczały 2–3%.

W użytym podczas doświadczeń tomografie rentgenowskim zastosowano odbiornik w postaci płaskiej płyty silikonowej o wymiarach 1920×1500 pikseli (wymiar pojedynczego piksela wynosił $127 \times 127 \mu\text{m}^2$). Nadajnik przystosowany był do generacji prądu o wartości napięcia $U_g = 40\text{--}160$ kV (rys. 6). W czasie pomiarów zastosowano następujące parametry:



Rys. 6. Laboratoryjny aparat rentgenowski (tomograf rentgenowski) zastosowany w czasie badań

- a) geometryczne tomografu rentgenowskiego:
 - 1) odległość między nadajnikiem a odbiornikiem: 0,577 m,
 - 2) odległość między nadajnikiem a próbką: 0,363 m,
 - 3) odległość między próbką a odbiornikiem: 0,214 m,
 - 4) współczynnik powiększenia: 1,589,
- b) odbiornika:
 - 1) liczba projekcji (radiografów): 720 (dla projekcji bez rotacji (klasyczny pomiar metodą RTG)),
 - 2) zakres rotacji próbki: 360°,
 - 3) czas pojedynczej ekspozycji: 100 ms,
 - 4) liczba pomiarów w czasie pomiaru kontynuualnego – 10 pomiarów/s,
 - 5) liczba ekspozycji w celu kalibracji: 50,
 - 6) wymiary pojedynczego piksela: $x=0,254 \mu\text{m}$, $y=0,254 \mu\text{m}$,
 - 7) liczba pikseli: $X=960$ (w poziomie), $Y=768$ (w pionie),
- c) nadajnika: wartości
 - 1) napięcia prądu $U_g = 145$ kV,
 - 2) natężenia prądu $I_g = 180 \mu\text{A}$,
 - 3) średnica punktu ogniskowej: $4 \mu\text{m}$.

Podczas doboru parametrów aparatu rentgenowskiego uwzględniono zalecenia oraz wyniki doświadczeń Rahmaniana i in. [43], Caulkina i in. [11] oraz Buffiere'a i in. [8].

W celu uniknięcia wpływu promieniowania miękkiego zastosowano dodatkowy filtr z blachy miedzianej o grubości 0,3 mm. Promieniowanie o niskiej energii emisyjnej zostało zaabsorbowane w elemencie z blachy miedzianej i ograniczyło możliwość powstawania zaburzeń obrazu (artefaktów). Wyniki pomiarów zapisywano w postaci 16-bitowych plików w formacie *.tiff. Każdy z eksperymentów powtarzany był dwukrotnie, niezależnie od sposobu zagęszczenia początkowego. Wszystkie doświadczenia przeprowadzono w klimatyzowanym pomieszczeniu o stałej temperaturze powietrza 20–24°C i wilgotności względnej nieprzekraczającej 60%.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Al-Raoush R. (2007), Microstructure characterization of granular materials. *Physica A: Statistical mechanics and its Applications*, nr 377, s.545–558
- [2] Alshibli K.A., Sture S., Costes N.C. i in. (2000), Assessment of local deformation in sand using X-ray computed tomography. *Geotechnique Test Journal*, vol. 23, nr 3, s.274–299
- [3] Baxter G.W., Behringer R.P. (1990), Pattern formation and time-dependence in flowing sand. *Two Phase Flows and Waves*, Springer Verlag, New York, s.1–29
- [4] Beck M.S., Williams R.A. (1996), Process tomography: a European innovation and its applications. *Measurement Science and Technology*, nr 7, s.215–224
- [5] Berthel A., Bonin T., Cadilhon S. i in. (2007), Digital radiography: description and user's guide. DIR 2007 – International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography, June 25–27, 2007, Lyon, France
- [6] Birkinshaw I. (2000), The revolution in silo discharge. *International Conference on Powder and Bulk Solids Handling*, London, s.109–118
- [7] Blair-Fish P., Bransby P. (1973), Flow pattern and wall stresses in a mass-flow bunker. *J. Eng. Ind. Trans. ASME, B vol. 95*, nr 1, s.17–26
- [8] Buffière J.-Y., Cloetens P., Ludwig P. i in. (2008), In situ X-ray tomography studies of microstructural evolution combined with 3D modeling. *MRS Bulletin*, nr 33
- [9] Buick J.M., Pankai Y., Ooi J.Y. i in. (2004), Motion of granular particles on the wall of a model silo and the associated wall vibrations. *J. Phys. D. Appl. Phys.* nr 37, s.2751–2760
- [10] Buick J.M., Chavez-Sagarnaga J., Zhing Z. i in. (2005), Investigation of silo-honking: slip-stick excitation and wall vibration. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, vol. 131, nr 3, s.299–307
- [11] Caulkin R., Jia X., Xu C. i in. (2009), Simulations of structures in packed columns and validation by X-ray tomography. *Ind. Eng. Chem. Res.*, nr 48, s.202–213
- [12] Fischer H., Hoppe D., Schleicher E. i in. (2008), An ultra fast electron beam X-ray tomography scanner. *Measurement Science and Technology*, nr 19, doi: 10.1088/0957-0233/19/9/094002
- [13] Fischer R., Gondret P., Rabaud M. (2005), Velocity fields of intermittent granular avalanches *Proceedings of International Conference*. W: Garcia-Rojo R., Herrmann H.J., McNamara S. (red.) *Powders and Grains*. Taylor and Francis Group, London, s.803–805
- [14] Frøystein T. (1993), Gamma-ray Flow Imaging. *Proceedings of European Concerted Action on Process Tomography*, Karlsruhe, Germany, s.338–341
- [15] Grudzień K. (2012), Radiography image processing for analysis of gravitational funnel flow. *Computer science in Novel applications*, Lodz University of Technology, Łódź, s.137–158
- [16] Grudzień K., Niedostatkiewicz M., Adrien J. i in. (2010a), Quantitatively description of the bulk solid concentration changes based on X-ray continuous radiation. *Proceedings of the 6th World Congress on Industrial Process Tomography (WC IPT-6)*, Beijing, China, s.464–479
- [17] Grudzień K., Niedostatkiewicz M., Sankowski D., Maire E. (2010b), Measurement of volume changes during gravitational flow in the silo based on the X-ray radiographs using PIV technique. *Proceedings of the 6th World Congress on Industrial Process Tomography (WC IPT-6)*, Beijing, China, s.1376–1388
- [18] Grudzień K., Niedostatkiewicz M., Maire E. i in. (2010c), Measurement of solid concentration changes at funnel flow silo using X-ray tomography. *Proceedings of the 6th World Congress on Industrial Process Tomography (WC IPT-6)*, Beijing, China, s.1341–1352
- [19] Grudzień K., Niedostatkiewicz M., Adrien J. i in. (2011a), Quantitative estimation of volume changes of granular materials during silo flow using X-ray tomography. *Chemical Engineering and Processing*, vol. 50, nr 1, s.59–67
- [20] Grudzień K., Niedostatkiewicz M., Babout L., Adrien J. (2011b), Application of Particle Image Velocimetry method for monitoring the volume changes during silo flow on the basis of X-radiographs. *Zeszyty Naukowe AGH, Pótrocznik Automatyka*, Kraków, vol. 14, nr 3, s.381–390
- [21] Grudzień K., Niedostatkiewicz M., Adrien J. i in. (2012), Analysis of the bulk solid flow during gravitational silo emptying using X-ray and ECT tomography. *Powder Technology*, nr 224, s.196–208
- [22] Gudehus G. (1986), Einige Beiträge der Bodenmechanik zur Entstehung und Auswirkung von Diskontinuitäten. *Felsbau*, nr 4, s.190–195
- [23] Hammar L., Wirdelius H. (2007), Radiographic sensitivity improved by optimized high resolution X-ray detector design. DIR 2007 – International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography, June 25–27, 2007, Lyon, France
- [24] Hutter K., Kuerchner N. (2003), PIV for granular avalanches. *Dynamical response of granular and powder materials in large and catastrophic deformations*. Springer
- [25] James R. (1965), Stress and strain fields in sand. PhD Thesis. University of Cambridge, Cambridge.
- [26] Jaworski A., Dyakowski T. (2001): Application of electrical capacitance tomography for measurement of gas-solids flow characteristics in a pneumatic conveying system. *Measurement Science and Technology*, nr 12, s.1109–1119
- [27] Kaestner A., Lehmann E., Stampanoni M. (2008), Imaging and image processing in porous media research. *Advances in Water Resources*, nr 31, s.1174–1187
- [28] Kohse W.C. (2002), Experimentell Untersuchung von Scherfugenmustern in Granulaten, Diplomarbeit, Institute for Soil and Rock Mechanics. University of Karlsruhe, Karlsruhe, s.1–42
- [29] Kuper K.E., Zarko V.E., Kvasov A.A. i in. (2010), High-resolution X-ray computed tomography of low-contrast samples with the use of synchrotron radiation. *Proceedings of the 6th World Congress on Industrial Process Tomography (WC IPT-6)*, Beijing, China, s.451–456
- [30] Lytvyn O.M., Pershina Y.I., Litvin O.O. i in. (2010), New method of restoration of internal structure 3D bodies by means of projections which arrive from a computer tomograph. *Proceedings of the 6th World Congress on Industrial Process Tomography (WC IPT-6)*, Beijing, China, s.436–429
- [31] Marashdeh Q., Warsito W., Fan L.S., Teixeira F. (2008), Dual imaging modality of granular flow based on ECT sensors. *Granular Matter*, nr 10, s.75–80
- [32] Michalowski R.L. (1984), Flow of granular material through a plane hopper. *Powder Technology*, nr 39, s.29–40
- [33] Michalowski R.L. (1990): Strain localization and periodic fluctuations in granular flow processes from hoppers. *Geotechnique* vol. 40, nr 3, s.389–403
- [34] Mokni M. (1992), Relations entre deformations en masse et deformations localisees dans les materiaux granulaires. PhD thesis. University of Grenoble, Grenoble
- [35] Moreno-Atanasio R., Williams R.A., Jia X. (2010), Combining X-ray microtomography with computer simulation for analysis of granular and porous materials. *Particuology*, vol. 8, nr 2, s.81–99
- [36] Nakashima Y., Watanabe T. (2002), Estimate of transport properties of porous media by microfocus X-ray computed tomography and random walk simulation. *Water Resources Research*, nr 38, s.1272
- [37] Niedostatkiewicz M. (2014), Badania deformacji w materiałach sypkich podczas dynamicznego przepływu w silosach. *Monografia*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 145, 1-371
- [38] Niedostatkiewicz M., Tejchman J. (2005a), Application of a Particle Image Velocimetry technique for deformation measurements of bulk solids during silo flow. *Powder Handling & Processing*, vol. 17, nr 4, s.216–220
- [39] Niedostatkiewicz M., Tejchman J. (2005b), Zastosowanie nowej metody pomiaru zmian porowatości w materiałach sypkich podczas procesu płynięcia w silosach. 51 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Ładowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Gdańsk–Krynica, IV, s.49–56
- [40] Niedostatkiewicz M., Tejchman J. (2007), Investigations of porosity changes during granular silo flow using Electrical Capacitance Tomography (ECT) and Particle Image Velocimetry (PIV). *Particle and Particle Systems Characterization*, vol. 24, nr 4–5, s.304–312
- [41] Nübel K. (2002), Experimental and numerical investigation of shear localisation in granular materials. *Publication Series of the Institute of Soil and Rock Mechanics*, University Karlsruhe, Karlsruhe, s.62

- [42] Pengpan T., Mitchell C.N., Soleimani M. (2010), Compensating for motion artefacts in X-ray CT using Electrical Impedance Tomography data. Proceedings of the 6th World Congress on Industrial Process Tomography (WCIPT-6), Beijing, China, s.1132–1548
- [43] Rahmanian N., Ghadiri M., Jia X., Stepanek F. (2009), Characterisation of granule structure and strength made in a high shear granulator. Powder Technology, nr 192, s.184–194
- [44] Richard P., Philippe P., Barbe F. i in. (2003), Analysis by X-ray microtomography of a granular packing undergoing compaction. Physical Review E, nr 68, 020301
- [45] Roscoe K.H., Arthur J.R.F., James R.G. (1963), The determination of strains in soils by an X-ray method. Civ. Eng. Public Works Rev., nr 58, s.873–876, 1009–1012
- [46] Scott D.M., McCann H. (2005), Process imaging for automatic control. Taylor and Francis Group, nr 439
- [47] Selomulya C., Jia X., Williams R.A. (2005), Direct prediction of structure and permeability of flocculated structures and sediments using 3D tomographic imaging. Chemical Engineering research and Design, nr 83, s.844–852
- [48] Shi B., Murakami Y., Wu Z. i in. (1999), Monitoring of internal failure evolution in soils using computerization X-ray tomography. Engineering Geology, vol. 54, nr 3–4, s.321–328
- [49] Sideman S., Hijikata K. (1993), Imaging in Transport Processes. Begell House, nr 621
- [50] Sielamowicz I., Kowalewski T., Błoński S. (2005), Application of digital particle image velocimetry in registrations of central and eccentric granular material flows. Proceedings of International Conference Powder and Grains, s.903–908
- [51] Slominski C., Niedostatkiewicz M., Tejchman J. (2006), Deformation measurements in granular bodies using a Particle Image Velocimetry technique. Archives of Hydro- and Environmental Engineering, vol. 53, nr 1, s.71–94
- [52] Slominski C., Niedostatkiewicz M., Tejchman J. (2007), Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement during granular silo flow. Powder Technology, vol. 173, nr 1, s.1–18
- [53] Stock S.R. (2008), Recent advances in X-ray micro-tomography applied to material. International Materials Reviews, vol. 53, nr 3, s.129–181
- [54] Suzuki M., Shinmura T., Limura K., Hirota M. (2008), Study of the wall effect on particle packing structure using X-ray microcomputed tomography. Advanced Powder Technology, nr 19, s.183–195
- [55] Tejchman J., Wu W. (1995), Experimental and numerical study of sand-steel interfaces. Int. Journal of Numerical and Anal. Methods in Geomechanics, vol. 19, nr 8, s.513–537
- [56] Vacher P., Dumoulin S., Morestin F., Mguil-Touchai S. (1999), Bidimensional strain measurement using digital images. Proc. Instn. Mech. Eng., nr 213, s.811–817
- [57] Vardoulakis I. (1977), Scherfugenbildung in Sandkörpern als Verzweigungsproblem. PhD thesis. Institute for Soil and Rock Mechanics, Karlsruhe University, Karlsruhe, s. 70
- [58] West R.M., Jia X., Williams R.A. (2000), Parametric modelling in industrial process tomography. Chemical Engineering Journal, vol. 77, nr 1–2, s.15, 31–36
- [59] White D.J., Take W.A. (2002), GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing. Technical Report D-SOILS-TR322, Cambridge University, Cambridge
- [60] White D.J., Take W.A., Bolton M.D. (2003), Soil deformation measurements using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. Geotechnique, vol.53, nr 7, s.619–631
- [61] White D.J., Randolph M., Thompson B. (2005), An image-based deformation measurement system for the geotechnical centrifuge. Int. J. Phys. Model. Geotech. nr 3, s.1–12
- [62] Williams R.A., Jia X. (2003), Tomographic imaging of particulate systems. Advanced Powder Technology, vol.14, nr 1, s.1–16

XXVII Konferencja Naukowo-Techniczna AWARIE BUDOWLANE 2015 w Międzyzdrojach odbędzie się 20-23 maja 2015 roku

ORGANIZATORZY KONFERENCJI:

- Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN – Przewodniczący prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski
- Komitet Nauki PZITB – Przewodniczący prof. dr hab. inż. Andrzej Łapko
- Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa – Przewodniczący mgr inż. Ryszard Trykosko
- Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie – Rektor prof. dr hab. inż. Włodzimierz Kiernożycki
- Wydział Budownictwa i Architektury Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego – Dziekan prof. dr hab. inż. Maria Kaszyńska
- Instytut Techniki Budowlanej – dr inż. Jan Bobrowicz

KOMITET ORGANIZACYJNY:

- Przewodnicząca - prof. ZUT dr hab. inż. Maria Kaszyńska
- Wiceprzewodniczący - prof. dr hab. inż. Ryszard Coufal
- Sekretarz Organizacyjny - dr inż. Tomasz Wróblewski
- Członkowie - mgr inż. Jarosław Błyszko, dr inż. Jolanta Borucka-Lipska, dr inż. Stefan Nowaczyk, dr inż. Teresa Paczkowska, dr inż. Leszek Stachecki

BIURO KONFERENCJI:

Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa
Oddział w Szczecinie
70-483 Szczecin, AL. Wojska Polskiego 99
tel.: 91 423 33 52, fax.: 91 423 34 97
mgr inż. Marta Tarnowska