

Prof. dr hab. inż. Lech Dietrich  
Ul. Iskry 39  
01-472 Warszawa

Recenzja rozprawy habilitacyjnej na temat analizy płynięcia materiałów granulowanych w modelach silosów, oraz całokształtu dorobku naukowo-badawczego, naukowo-organizacyjnego i dydaktycznego Pani dr inż. Ireny Sielamowicz w związku z wszczętym przewodem habilitacyjnym.

Recenzję wykonano na podstawie zlecenia Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN z dnia 8.11.2011 w związku z uchwałą Rady Naukowej IPPT PAN z dnia 27 maja 2011 roku.

**Zakres rozprawy habilitacyjnej.**

Rozprawę habilitacyjną Pani dr inż. Ireny Sielamowicz stanowi zbiór 13 następujących publikacji naukowych:

1. I. Sielamowicz, Kształtowanie się stref zastoju w grawitacyjnym wypływie ziaren łubinu i żyta w płaskim modelu silosu, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej Nr 119, 1998, 201-216.
2. I. Sielamowicz, Analiza numeryczna parcia ośrodka sypkiego w leju silosu z wykorzystaniem modelu ciała idealnie plastycznego, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej Nr 22, 2002, 303-316.
3. I. Sielamowicz, Cyfrowa technika optyczna DPIV w pomiarach przepływu ziaren amarantusa w płaskim modelu silosu, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej Nr 25, 2004, 277-287.
4. I. Sielamowicz, S. Błoński, T.A. Kowalewski, Optical technique DPIV in measurements of granular material flows, Part 1 of 3 – plane hoppers, Chemical Engineering Science 60, 2005, 589-598.
5. I. Sielamowicz, Experimental analysis of granular material flows using the technique of digital particle image velocimetry, Engineering Transactions, 53, 2, 2005, 197-229.
6. I. Sielamowicz, S. Błoński, T.A. Kowalewski, Digital particle image velocimetry (DPIV) technique in measurements of granular material flows, Part 2 of 3 – converging hoppers, Chemical Engineering Science 61, 2006, 5307-5317.
7. R. Balevičius, R. Kačianauskas, Z. Mróz, I. Sielamowicz, Discrete element method applied to multiobjective optimization of discharge flow parameters in hoppers, Structural and Multidisciplinary Optimization, 31, 3, 2006, 163-175.
8. R. Balevičius, R. Kačianauskas, Z. Mróz, I. Sielamowicz, Microscopic and macroscopic analysis of granular material behaviour in 3D flat – bottomed hopper by discrete element method, Archives of Mechanics, 59, 3, 2007, 1-27.
9. R. Balevičius, R. Kačianauskas, Z. Mróz, I. Sielamowicz, Discrete – particle investigation of friction effect in filling and unsteady/steady discharge in three – dimensional wedge – shaped hopper, Powder Technology, 187, 2008, 159-174.
10. I. Sielamowicz, M. Czech, T.A. Kowalewski, Empirical description of flow parameters in eccentric flow inside a silo model, Powder Technology, 198, 2010, 381-394.
11. I. Sielamowicz, M. Czech, Analysis of the radial flow assumption in a converging model silo, Biosystems Engineering, 106, 2010, 412-422.
12. I. Sielamowicz, M. Czech, T.A. Kowalewski, Empirical description of granular flow inside a model silo with vertical walls, Biosystems Engineering, 108, 2011, 334-344.
13. R. Balevičius, R. Kačianauskas, Z. Mróz, I. Sielamowicz, Analysis and DEM simulation of granular material flow patterns in hopper models of different shapes, Advanced Powder Technology, 22, 2011, 226-235.

Tematyka wszystkich wymienionych wyżej prac opublikowanych w latach 1998 – 2011 dotyczy analizy płynięcia materiałów ziarnistych w modelach silosów i jest ściśle związana z zakresem rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz. Zbiór prac wchodzących w skład pracy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz dotyczy dwóch istotnych problemów zachowanie się ośrodków ziarnistych w fazie zasypywania, magazynowania i opróżniania silosu. Pierwszy z nich dotyczy kinematyki procesu opróżniania, ale i również zasypywania silosu. Problem drugi dotyczy wyznaczania stanu naprężenia, a więc i parć ośrodka sypkiego na ścianki silosu w trakcie magazynowania i opróżniania silosu, ale również i w trakcie zasypywania silosu. Rozważania większości tych prac dotyczą małych i płaskich silosów i nie opisują zachowania się ośrodków ziarnistych w silosach rzeczywistych. Przeniesienie wyników badań modelowych na konstrukcje rzeczywiste nie jest możliwe ze względu na brak podobieństwa modelowego. Celem podstawowym jaki stawiany jest w kolejnych pracach zestawu habilitacyjnego Pani dr inż. Ireny Sielamowicz jest weryfikacja założeń i wyników procedur obliczeniowych proponowanych w literaturze naukowej i zaleceniach normowych.

Dwie pierwsze prace zestawu habilitacyjnego można traktować jako wprowadzenie do tematu. W pierwszej z nich przedstawiono wyniki badań doświadczalnych obrazujących tworzenie się stref zastoju w trakcie opróżniania płaskiego modelu silosu wypełnionego ziarnami łubinu i żyta. Model silosu miał wysokość 660 mm, a trajektorie poszczególnych ziaren określano na podstawie zdjęć przez przezroczystą płaską ścianę modelu silosu przy stosunkowo długim czasie naświetlenia (0,25 i 0,5 s), przy którym ziarna poruszające się dawały smugowy obraz trajektorii, a ziarna nieruchome dawały ostry obraz. Granica tych dwóch obszarów określała granicę stref zastoju. Badania wykonano dla płaskiego i wyprofilowanego dna silosu stwierdzając formowanie się wypływu kominowego w początkowej fazie i tworzenie się stref zastoju niezależnie od kształtu profilu dna silosu. Zastosowana technika pomiarowa daje tylko jakościowy obraz trajektorii w strefie wypływu i kształt stref zastoju przylegających do ścianek silosu.

W drugiej pracy przeprowadzono analizę numeryczną stanu naprężenia dla trzech ośrodków, żwiru rzeczno, łubinu i rudy ołowiu, wypełniających osiowo symetryczny silos ze stożkowym lejem opróżniania. Przyjęto idealnie plastyczne modele ośrodków z warunkiem plastyczności Coulomba. Dwa równania ruchu, warunek plastyczności, warunek Haara i Karmana oraz warunek izotropii i nieściśliwości tworzą układ sześciu równań z czterema składowymi naprężeniami i dwiema składowymi prędkościami płynięcia. Przyjęto klasyczną procedurę rozwiązywania zaproponowaną przez W.W. Sokołowskiego przyjmując określone wartości kąta tarcia na ścianie silosu. Wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono w postaci rozkładów naporu na ścianę silosu wzdłuż jego wysokości dla różnych faz wypływu.

W trzeciej pracy podjęto próbę jakościowego i ilościowego wyznaczenia pola przepływu ośrodka sypkiego w silosie przy jego opróżnianiu. Przedstawiono wstępne wyniki obrazowania pola przepływu ośrodka z wykorzystaniem cyfrowej techniki obrazowania prędkości cząsteczek znanej pod nazwą Digital Particle Image Velocimetry, w której przemieszczenia poszczególnych punktów oblicza się z korelacji obszarów roboczych na zdjęciach wykonanych w dwóch kolejnych chwilach czasowych. Pomiary wykonano w Zakładzie Mechaniki i Fizyki Płynów Instytutu Podstawowych Problemów Techniki wykorzystując zestaw pomiarowy i oprogramowanie w wersji dostosowanej do analizy procesów mechaniki płynów. Zastosowana technika pomiarowa należy do grupy optycznych metod pomiarowych rozwijanych intensywnie w ostatnich latach i znanych pod nazwą cyfrowej korelacji obrazów. Wykorzystując płaski model silosu o wysokości 800 mm z przezroczystą ścianą przednią wykonano serie zdjęć ruchu ośrodka przy otwartym otworze wylotowym. Z kolejnych zdjęć obliczono przemieszczenia poszczególnych punktów w całym zarejestrowanym na zdjęciu polu widzenia kamery, a następnie obliczono chwilowe, uśrednione prędkości przemieszczeń dla znanego odstępów czasu pomiędzy kolejnymi zdjęciami. Wszystkie pomiary wykonano dla silosu zasypanego ziarnami amarantusa, dla kilku wariantów ukształtowania dna silosu. Wyniki pomiarów przedstawiono w postaci profili pionowej składowej prędkości ziaren, rozkładów wektorów prędkości i chwilowych

trajektorii ziaren. Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność zastosowanej techniki pomiarowej do wyznaczenia pola płynięcia materiału zmagazynowanego w silosie w trakcie jego opróżniania.

Wyniki systematycznych pomiarów pola płynięcia zmagazynowanego materiału w silosie w trakcie jego opróżniania przedstawiono w dwóch pracach Pani dr inż. Ireny Sielamowicz z dwoma współautorami (S. Błoński, T.A. Kowalewski). Prace opublikowanymi w czasopiśmie *Chemical Engineering Science* w 2005 roku (poz. 4) i 2006 roku (poz. 6). Płaski, prosty silos o wysokości 800 mm zasypywano trzema różnymi rodzajami ośrodków ziarnistych, mianowicie ziarnami amarantusa w postaci kuleczek o średnicy około 1 mm, ziarnami siemienia lnianego w postaci spłaszczonych elipsoid o wymiarach 4 mm × 2 mm oraz ziarnami gryki w postaci piramid o wysokości około 2 mm. Wyniki przedstawione w postaci graficznej wskazują na istotny wpływ rodzaju materiału na charakter przepływu ośrodka i rozmiary stref zastoju wzdłuż długości ścian silosu. Szczegółowe i systematyczne wyniki badań w postaci pola wektorów płynięcia i chwilowych trajektorii cząsteczek przedstawiono dla wszystkich trzech badanych materiałów. Wyraźnie ukształtowany, wąski kanał wypływu o szerokości tylko 1/3 szerokości silosu zaobserwowano dla ziaren amarantusa. Nieco szerszy kanał wypływu wystąpił przy opróżnianiu silosu załadowanego ziarnami siemienia lnianego, natomiast ziarna gryki dawały wypływ masowy obejmujący całą szerokość silosu. Zależność formy wypływu od rodzaju ośrodka sypkiego zalegającego w silosie jest wyraźnie widoczna, a zastosowana technika pomiarowa umożliwia jakościowe i ilościowe określenie kinematyki płynięcia materiału i granic stref zastoju.

W drugiej z tej grupy prac (poz. 6) przedstawiono analogiczne wyniki pomiarów dla fazy opróżniania silosu o ścianach zbieżnych. Silos zasypywano ziarnami amarantusa do wysokości 600 mm od poziomego otworu wylotowego. Pole prędkości wypływu przedstawiono w postaci kolorowych konturów o stałej wartości prędkości, pola wektorów płynięcia, chwilowych trajektorii płynięcia i profili prędkości wzdłuż wybranych przekrojów silosu. Również i tym przypadku, przy zbieżnym ukształtowaniu bocznych ścian silosu stwierdzono tworzenie się kominowego wypływu w początkowej fazie, który stopniowo przechodził do formy promieniowego wypływu ale dopiero w ostatniej fazie opróżniania silosu.

Zestawienie wyników dwóch prac wymienionych w poprzednim akapicie (poz. 4 i 6) uzupełnione pomiarami pola kinematycznego wypływu trzech ośrodków ziarnistych z silosu prostego z niesymetrycznie położonym otworem wylotowym przedstawiono w kolejnej, samodzielnej i obszernej pracy Pani dr inż. Ireny Sielamowicz (poz. 5). Wyniki pomiarów z wykorzystaniem tej samej cyfrowej techniki obrazowania prędkości cząsteczek przedstawiono w formie analogicznej do opisanych poprzednio prac. W pracy tej podjęto dodatkowo próbę wzbogacenia analizy wyników poprzez wyznaczenie prędkości odkształceń w różnych chwilach czasowych i różnych przekrojach poprzecznych. Ograniczono się jednak tylko do fragmentarycznych wyników numerycznej procedury różniczkowania dla pionowej składowej prędkości po współrzędnej poprzecznej dla kilku wykresów, porównując uzyskane wyniki dla symetrycznego wypływu z centralnie umieszczonym otworem wylotowym z wypływami niesymetrycznymi dla otworów wylotowych umieszczonych przy jednym lub drugim boku silosu.

Drugą bardzo ważną grupą prac zestawu habilitacyjnego Pani dr inż. Ireny Sielamowicz są cztery prace (poz. 7, 8, 9 i 13) opublikowane w bardzo dobrych czasopismach naukowych, wspólnie z trzema współautorami (R. Balevičius, R. Kačianauskas, Z. Mróz). Przedstawiono w nich wyniki symulacji komputerowych procesu zasypywania, zalegania i wysypywania z silosów o różnych kształtach materiałów ziarnistych przy wykorzystaniu oprogramowania metody elementów dyskretnych w wersji opracowanej na Uniwersytecie Technicznym w Wilnie. Jest to całkowicie odmienne podejście od opisywania ośrodka sypkiego jako ośrodka ciągłego. W metodzie elementów dyskretnych ośrodek sypki jest zbiorem elementów o określonym kształcie, którego zachowanie w trakcie opróżniania silosu wynika z uwzględnienia oddziaływania na siebie sąsiednich, stykających się elementów. We wszystkich, czterech pracach tej serii ośrodek sypki był odwzorowany kulkami o różnych średnicach wykonanych z materiału lepkosprężystego. Uwzględniano tarcie pomiędzy stykającymi się kulkami

oraz pomiędzy kulkami i ściankami silosu. Rozwiązane problemu płynięcia i oddziaływania materiału sypkiego w silosie uzyskano z algorytmów optymalizacji wielokryterialnej minimalizując czas i prędkość wypływu materiału sypkiego z silosu. W pierwszej z tej serii prac (poz. 7) przedstawiono wyniki symulacji zasypywania, osiadania materiału sypkiego i opróżniania silosów o prostych i nachylnych pod różnymi kątami bocznych ścian silosu. Ośrodek sypki odwzorowano kulkami o średnicy od 60 do 70 mm, przyjmując 1980 kulek zaspanych w silosie do wysokości 1700 mm. Szczegółowa analiza wyników symulacji komputerowej fazy napełniania i opróżniania silosu o prostych ścianach bocznych została przedstawiona w drugiej pracy z tej serii (poz. 8). W trzeciej pracy z tej serii (poz. 9) przedstawiono pełną analizę stanu odkształcenia i naprężenia ośrodka sypkiego w fazie napełniania i opróżniania silosu o zbieżnych ścianach bocznych nachylnych pod kątem  $22^\circ$ . W symulacji komputerowej zachowania się ośrodka sypkiego przyjęto 20400 kulek o średnicy od 25 do 34 mm zaspanych do wysokości 1200 mm. Wyniki przedstawiono w postaci obrazów wektorów pól prędkości płynięcia cząstek, rozkładów rozmieszczenia cząstek i rozkładów porowatości, rozkładów składowych i kierunków głównych naprężenia po napełnieniu i w różnych stadiach opróżniania silosu dla różnych wartości współczynnika tarcia pomiędzy cząsteczkami. W czwartej pracy z tej serii (poz. 13) przedstawiono pełną analizę stanu odkształcenia i naprężenia ośrodka sypkiego w fazie napełniania i opróżniania dla trzech silosów. Silosów płaskich o prostych i zbieżnych ścianach bocznych oraz silosu o zbieżnych ścianach bocznych w dwóch prostopadłych kierunkach. W symulacji komputerowej zachowania się ośrodka sypkiego przyjęto 1980 kulek o średnicy od 60 do 70 mm zaspanych do wysokości od 700 mm do 1500 mm, w zależności od kształtu silosu. Dodatkowo w pracy podjęto próbę porównania pola prędkości płynięcia i wartości naporu na ściany boczne silosu uzyskane z symulacji komputerowej metody elementów dyskretnych dla 20400 kulek z wartościami uzyskanymi z przeprowadzonego doświadczenia dla płaskiego silosu z prostymi ścianami bocznymi zasypanego grochem o średnicy od 7,2 do 7,8 mm. Uzyskano dobrą zgodność wyników symulacji z wynikami doświadczalnymi dla pola prędkości płynięcia ośrodka w fazie ustalonego wypływu. Większe rozbieżności obserwuje się w początkowej i końcowej fazie opróżniania silosu, co przypisuje się w pracy oddziaływaniu pojedynczych cząstek. Szczegółowe wyniki porównania symulacji komputerowej metodą elementów dyskretnych i danych doświadczalnych w zakresie pola prędkości i naporu na ściany silosu przedstawione były na dwóch konferencjach naukowych i zostały pominięte w habilitacyjnym zestawie prac.

Trzecią grupę prac zestawu habilitacyjnego Pani dr inż. Ireny Sielamowicz są trzy prace (poz. 10, 11, i 12) opublikowane w równie dobrych czasopismach naukowych, wspólnie z dwoma współautorami (M. Czech, T.A. Kowalewski). W pracach tych przedstawiono wyniki statystycznej analizy pomiarów pola przemieszczeń i prędkości płynięcia ośrodków ziarnistych w trakcie opróżniania silosów uzyskane przy pomocy cyfrowej techniki obrazowania prędkości cząsteczek znanej pod nazwą Digital Particle Image Velocimetry. W pierwszej z prac tej serii (poz. 10) przedstawiono wyniki pomiarów pola prędkości dla silosu o prostych ścianach bocznych z niesymetrycznie położonym, przy jednym z boków, otworem wylotowym, a następnie zaproponowano procedurę wygładzania poprzez opisywanie wartości doświadczalnych w poszczególnych przekrojach odpowiednio dobranymi funkcjami wykładniczymi. W drugiej pracy z tej serii (poz. 11) przedstawiono analogiczne wyniki przetwarzania i wygładzania danych doświadczalnych dla silosu o zbieżnych ścianach bocznych. Uzyskane wyniki upoważniają Autorów do pewniejszego podważenia przyjmowanego wcześniej założenia o radialnym polu prędkości dla silosów zbieżnych, jak to przyjmował Jenike (1961), a za nim wielu innych autorów. Trzecia praca (poz. 12) dotyczy przetwarzania i wygładzania wyników pomiarów dla procesu opróżniania silosu o prostych ścianach z płaskim dnem i centralnym otworze wylotowym.

#### **Ocena rozprawy habilitacyjnej.**

Silosy są powszechnie wykorzystywane do przechowywania materiałów ziarnistych w wielu dziedzinach gospodarki, a zwłaszcza w przemyśle budowlanym, chemicznym i w rolnictwie. Wyznaczenie stanu naprężenia i odkształcenia w materiale przechowywanym w silosie jest

podstawowym zadaniem określającym wytrzymałościowe parametry projektowe konstrukcji silosów. Problem jest ważny z technicznego punktu widzenia ze względu na skalę zastosowań tego typu konstrukcji w praktyce, ale jest też istotny z naukowego punktu widzenia ze względu na brak akceptowalnej i prawidłowej procedury teoretycznego wyznaczania stanu naprężenia i odkształcenia w różnorodnych ośrodkach ziarnistych magazynowanych w silosach. Procedury obliczeniowe stosowane w praktyce inżynierskiej wynikają z przyjęcia szeregu założeń upraszczających, które powinny być weryfikowane doświadczalnie. Literatura naukowa tego zagadnienia jest bardzo bogata. Podejmowano wiele prób uzyskania rozwiązań kompletnych zestawu równań teorii plastyczności, stosowano różnorodne techniki doświadczalne i numeryczne procedury obliczeniowe. Uproszczone modele zachowania się ośrodków ziarnistych pod obciążeniem i trudne do określenia warunki brzegowe, zwłaszcza warunki tarcia na ścianach silosu uniemożliwiają uzyskanie rozwiązań kompletnych tego tak ważnego z technicznego punktu widzenia problemu. Podejmowane w wielu ośrodkach naukowych na świecie liczne próby rozwiązania tego zagadnienia doprowadziły do rozwiązań przybliżonych, wynikających z przyjęcia szeregu założeń upraszczających. Również i w Polsce inicjowano duże projekty badawcze już ponad trzydzieści lat temu, a uzyskane wyniki w syntetycznej formie opisano w monografii A. Dreschera pt. „Metody obliczeń parć i przepływu materiałów ziarnistych w zbiornikach”, wydanej przez PWN w 1983 roku. Wyznaczenie parć i przepływu ośrodków ziarnistych w silosach niezbędne przy projektowaniu silosów uzyskuje się dotychczas z rozwiązań przybliżonych.

Celem rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz jest wyznaczenie stanu odkształcenia i naprężenia w ośrodkach ziarnistych w silosach w trakcie ich napełniania i opróżniania. Znaczenie problematyki rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz dla praktyki inżynierskiej jest dobitnie podkreślone licznymi katastrofami, które w przypadku dużych silosów prowadzą zawsze do bardzo dużych strat. Motywacje te są też przytoczone w skróconym opisie rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz i jeśli nawet uwzględnić, że znaczna część tych katastrof ma naturę inną od mechanicznej, a wynika z różnorodnych procesów zachodzących w przechowywanych materiałach prowadzących np. do samozapłonu czy wybuchu nagromadzonych pyłów, to i tak naukowa i techniczna aktualność problematyki rozprawy habilitacyjnej jest oczywista i potwierdzona liczbą prac publikowanych w najlepszych czasopismach naukowych. Syntetyczne omówienie zakresu i wyników dotychczasowych badań prowadzonych w różnych ośrodkach na całym świecie jest bardzo dobrze przedstawione w kolejnych pracach zestawu rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz, zwłaszcza w pracach ostatnich przedstawionej poprzednio listy.

Wybór prac rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz jest starannie dobrany i dopasowany do tytułu całego zbioru. Precyzja sformułowań wymaga jednak zastąpienia w tytule rozprawy słowa „granulowanych” słowem „ziarnistych”. Z tych samych względów uważam, że użycie w tytule rozprawy habilitacyjnej określenia „w modelach silosów” jest mylące ze względu na brak podobieństwa modelowego. Faktycznie każde z zadań rozpatrywanych w kolejnych pracach zestawu habilitacyjnego dotyczy innej skali. Pomiar pola prędkości przy pomocy cyfrowej techniki obrazowania prędkości cząsteczek dla płaskiego silosu wykonano dla zbioru co najmniej 30 milionów ziaren amarantusa o średnicy 1 mm. Obliczenia metodą elementów dyskretnych wykonano dla zbioru 1980 kulek o średnicy 60 mm, w pierwszym i trzecim zadaniu, oraz 20400 kulek o średnicy 25 mm w drugim zadaniu. Ten brak spójności warunków brzegowych ma oczywiście swoje uzasadnienie w ograniczeniach poszczególnych metod badawczych, ale uniemożliwia bezpośrednie porównanie wyników.

Zasadniczym celem rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz nie jest jednak ilościowe porównanie wyników badań przy wykorzystaniu różnych technik pomiarowych i obliczeniowych, ale ocena poprawności założeń procedur obliczeniowych, a zwłaszcza zaleceń normowych wykorzystywanych w projektowaniu silosów. Uważam, że postawiony cel rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz został osiągnięty, co potwierdzają przedstawione wyniki badań doświadczalnych i symulacji komputerowych.

Ważnym i indywidualnym osiągnięciem Pani dr inż. Ireny Sielamowicz było dobranie technik pomiarowych i obliczeniowych odpowiednich do precyzyjnej analizy procesów płynięcia ośrodków ziarnistych w silosach. Wyniki dwóch pierwszych prac zestawu publikacji habilitacyjnych wskazywały na ograniczone możliwości poszukiwania numerycznych rozwiązań kompletu równań teorii plastyczności, czy jakościowej oceny stref płynięcia metodami fotografii tradycyjnej.

Poszukując skutecznych metod jakościowej i ilościowej analizy pól płynięcia ośrodków ziarnistych w trakcie opróżniania silosów Pani dr inż. Irena Sielamowicz zdecydowała się na wykorzystanie techniki cyfrowej korelacji obrazów, rozwijanej intensywnie w wielu ośrodkach naukowych, zwłaszcza do wizualizacji deformacji materiałów i elementów konstrukcji. Skutecznym i szybkim sposobem sprawdzenia możliwości tej nowoczesnej techniki pomiarowej określającej wektory przemieszczeń w całym polu obserwacji, a nie tylko punktowo, było bez wątpienia wciągnięcie do współpracy doświadczonego zespołu dysponującego specjalistycznym oprzyrządowaniem i oprogramowaniem do tego typu pomiarów. Współpraca z zespołem Zakładu Mechaniki i Fizyki Płynów IPPT w tym względzie przyniosła oczekiwane rezultaty, a wyniki wspólnych badań wizualizacji pól płynięcia w trakcie opróżniania silosów dla różnych materiałów dla płaskich silosów o różnych kształtach przedstawiono w pięciu publikacjach włączonych do zestawu prac habilitacyjnych (poz. 3, 4, 5, 6 i 10).

Technika cyfrowej korelacji obrazów wykorzystywana jest do analizy płynięcia ośrodków ziarnistych w silosach w coraz szerszym stopniu od początku lat dwutysięcznych. Doskonalono układy gromadzenia i przetwarzania danych doświadczalnych. Powstało wiele nowych firm oferujących aparaturę i oprogramowanie dedykowane do specjalizowanych zagadnień badawczych. Zestaw aparatury i oprogramowania wykorzystywany w badaniach prowadzonych przez Panią dr inż. Irenę Sielamowicz dedykowany był do pomiarów pól płynięcia cieczy i gazów. Wynikały stąd pewne ograniczenia możliwości przetwarzania danych doświadczalnych. Podstawowym wynikiem pomiarów cyfrowej korelacji obrazów jest pole przemieszczeń w całym obszarze obserwacji w kolejnych sekwencjach ruchu w jakich zrobiono zdjęcia. Wyznaczenie pola odkształceń wymaga stosowania procedur numerycznego różniczkowania przemieszczeń po współrzędnych. Procedury te są zwykle wbudowane w oprogramowanie cyfrowej korelacji obrazów, co w połączeniu z procedurami wygładzania umożliwia łatwą wizualizację nie tylko składowych przemieszczeń ale i odkształceń w całym polu obserwacji. Możliwości takiego przedstawienia wyników pomiarów nie wykorzystano w żadnej z wymienionych wyżej z tej grupy prac, jedynie w pracy wymienionej na pozycji 5 spisu publikacji habilitacyjnej pokazano rozkłady prędkości odkształceń ścinania w kilku pojedynczych przekrojach poprzecznych silosu.

Niedogodnością techniki cyfrowej korelacji obrazów, zresztą wskazaną w pracy są błędy pomiarowe przy dużych gradientach przemieszczeń. Sytuacja taka ma miejsce bezpośrednio po otwarciu otworu wylotowego, gdy w ułamkach sekundy rozwija się pole płynięcia na całej wysokości silosu. Tymczasem pierwszy obraz pola płynięcia pokazany w kolejnych pracach uchwycono dopiero po prawie czterech sekundach od utworzenia otworu wylotowego. Jest to wynik znacznie gorszy od prezentowanego w innych pracach przy tej samej technice pomiarowej, gdzie pierwszy obraz pola płynięcia zarejestrowano po czasie 0,3 s. Druga niedogodność zastosowanej techniki pomiarowej związana jest z błędami odwzorowania prędkości cząstek w bezpośrednim otoczeniu otworu wylotowego. W przypadku silosu klinowego pewnie z tego właśnie powodu ograniczono pole obserwacji znacznie powyżej otworu wylotowego (rys. 4, poz. 6). Brak wyjaśnień w pracy stwarza wątpliwości co do przydatności pomiarowej wykorzystanej wersji zestawu pomiarowego. Z oczywistych powodów szersza dyskusja tych ograniczeń zastosowanej metody pomiarowej została pominięta w publikacjach wchodzących w skład zestawu habilitacyjnego i jestem przekonany, że wątpliwości zostaną wyjaśnione w dalszej dyskusji. Uzupełniającego komentarza wymaga też autorska obietnica wszystkich prac tej serii o możliwości wyznaczenia stanu naprężenia na podstawie pól prędkości płynięcia określonych przy pomocy opisanej techniki pomiarowej.

Kolejnym etapem rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz jest grupa czterech współautorskich prac (poz. 7, 8, 9 i 13) stanowiących zbiór eksperymentów numerycznych

opisujących zachowanie się różnych ośrodków ziarnistych w płaskich i przestrzennych silosach o różnych kształtach. Poszukując sposobów opisanie zachowania się ośrodków ziarnistych w silosach Pani dr inż. Irena Sielamowicz sięgnęła do metody elementów dyskretnych, w której uwzględnia się oddziaływanie poszczególnych cząstek ośrodka ziarnistego. Sposób ten był już wykorzystywany wcześniej do symulacji pola płynięcia w silosach i można się było spodziewać dobrego odwzorowania zachowania się całego ośrodka ziarnistego przy dobrze dobranych właściwościach mechanicznych pojedynczego ziarna. Skuteczność metody elementów dyskretnych jest uwarunkowana z jednej strony modelem oddziaływania stykających się ziaren, a z drugiej strony efektywnością stosowanych algorytmów określających chwilowy stan płynięcia z wykorzystaniem metod optymalizacji wielokryterialnej. Podobnie jak poprzednio, skutecznym i szybkim sposobem sprawdzenia możliwości tej trudnej techniki obliczeniowej w pełni określającej stan deformacji i naprężenia w całym silosie w różnych fazach jego pracy było bez wątpienia wciągnięcie do współpracy specjalistów z IPPT i z Uniwersytetu Technicznego w Wilnie dysponującego specjalistycznym oprogramowaniem do tego typu obliczeń. Współpraca w tym względzie przyniosła oczekiwane rezultaty, a wyniki wspólnych badań zachowania się całego zbioru sferycznych elementów w trakcie napełniania, magazynowania i opróżniania silosów o różnych kształtach przedstawiono w czterech, wymienionych wyżej publikacjach włączonych do zestawu prac habilitacyjnych.

Uzyskane wyniki obliczeń są bez wątpienia oryginalne i wartościowe. Zastosowana technika obliczeniowa umożliwia określenie położenia i prędkości płynięcia poszczególnych ziaren oraz sił z jakimi działają wzajemnie na siebie stykające się ziarna. Metoda elementów dyskretnych okazała się bardzo skutecznym narzędziem analizy wpływu poszczególnych parametrów na zachowanie się ośrodków ziarnistych w silosach, czego przykładem jest ocena wpływu współczynnika tarcia przedstawiona we wszystkich pracach dla różnych kształtów silosu. Ważnym wynikiem jest symulowanie fazy napełniania silosu, fazy osiadania ośrodka wskutek uwzględnienia lepkich cech ziaren oraz fazy wysypywania ośrodka przez otwór spustowy. Istotnym i ważkim elementem przyjętej procedury obliczeń jest możliwość bezpośredniego wyznaczenia parć ośrodka na ściany silosu z uwzględnieniem oddziaływania poszczególnych ziaren w rozpatrywanym przekroju. Wyniki obliczeń można więc wykorzystać do weryfikacji przybliżonych metod obliczania parć na ściany silosu, jak i do weryfikacji założeń upraszczających. W obliczeniach można też uwzględnić podatność ścian silosu i efekty dynamiczne jakie generowane są przy napełnianiu, jak i przy opróżnianiu, a zwłaszcza bezpośrednio po otworzeniu otworu wylotowego. Są to bez wątpienia zalety metody elementów dyskretnych w odniesieniu do zagadnień stanu odkształcenia i naprężenia w ośrodkach ziarnistych w silosach.

Metoda elementów dyskretnych ma też swoje ograniczenia, które powinny być nieco szerzej omówione niż jest to przyjęte w publikacjach naukowych. Istotnym ograniczeniem jest liczba elementów dyskretnych, która wynosiła 1980 w pierwszym (poz. 7 i 8) i trzecim (poz. 13) zadaniu oraz 20400 w zadaniu drugim opisanym w pracy (poz. 9). Liczba elementów określa czas obliczeń i ze zrozumiałych względów nie może być nadmiernie duża. W większości rozpatrywanych w pracy zadaniach silosy były płaskie, jedynie w ostatniej z prac symulacja komputerowa dotyczyła silosu przestrzennego z klinowymi ścianami leja w dwóch kierunkach. Warto więc zapytać dlaczego dla płaskich silosów nie rozpatrywano przypadku dwuwymiarowego. Przyjmując w metodzie elementów dyskretnych krótkie walce zamiast sfer kulistych wprowadzamy istotne uproszczenie i skrócenie czasu obliczeń z możliwością wprowadzenia znacznie większej liczby elementów. Co więcej obliczone pole płynięcia można wówczas porównywać z obrazami pomierzonymi doświadczalnie dla płaskich przepływów. Traktowanie przepływów dwuwymiarowych jako przepływy 3D w obliczeniach metody elementów dyskretnych wprowadza zaburzenia przepływu w postaci zawirowań cząstek, co znakomicie ilustruje rys. 3 z pozycji 9. Efekt zawirowań jest zależny od przyjętej wartości współczynnika tarcia.

Słabością zestawu prac wchodzących w skład rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz są różnice warunków brzegowych poszczególnych zadań, o czym wspominałem już wcześniej. Różnice te

to inne rodzaje ziaren (średnica i kształt) oraz szerokość otworu wylotowego przyjmowane w doświadczalnej i symulacyjnej części pracy. Dopiero w ostatniej pracy (poz. 13) wykonano wstępne obliczenia dla 20400 ziarenek grochu o średnicy około 7 mm, dzięki czemu wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów pola płynięcia, a obliczone wartości naporu na ścianki silosu w dwóch różnych jego przekrojach porównano z wynikami pomiarów tensometrycznych.

Ostatnią grupą prac rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz są trzy współautorskie prace (poz. 10, 11, 12) opisujące procedury wygładzania pól płynięcia ośrodków ziarnistych w płaskich silosach o różnych kształtach wyznaczonych doświadczalnie przy pomocy cyfrowej techniki obrazowania prędkości cząsteczek. Wyniki obliczeń zilustrowano dla przykładowych przekrojów poprzecznych z zaznaczonymi punktami doświadczalnymi i przebiegami funkcji aproksymujących dla kolejnych etapów regresji. Celem nadrzędnym, jak rozumiem, jest dobranie postaci i parametrów funkcji najlepiej opisującej punkty doświadczalne, a następnie wprowadzenie opracowanych procedur do programu przetwarzającego już w sposób automatyczny dane doświadczalne. Procedura umożliwi eliminację różnorodnych zaburzeń przepływu, zmniejszy błędy pomiarowe, zwłaszcza w obszarach o małych przemieszczeniach w otoczeniu stref zastoju, a tym samym uprości procedury numerycznego różniczkowania. Z przedstawionego opisu nie wynika czy wszystkie te cele zostały osiągnięte. Podkreślono wyraźnie, że zaproponowany schemat obliczeń zwiększa pewność wniosków potwierdzających lub zaprzeczających założeniom upraszczającym zalecanym uprzednio w literaturze przedmiotu. Tym założeniem upraszczającym, które nie zostało potwierdzone w pomiarach pola płynięcia przy pomocy cyfrowej techniki obrazowania prędkości cząsteczek okazał się przepływ radialny w silosach klinowych, przynajmniej w odniesieniu do ośrodków ziarnistych wykorzystywanych w poszczególnych pracy zestawu habilitacyjnego.

Rozprawa habilitacyjna Pani dr inż. Ireny Sielamowicz przedstawiona w postaci czterech samodzielnych i dziewięciu współautorskich publikacji naukowych dotyczy mechaniki ośrodków ziarnistych w silosach i zgodnie z przytoczoną wyżej argumentacją stanowi znaczący wkład do rozwoju mechaniki. Wkład poszczególnych autorów został ściśle sprecyzowany w ich indywidualnych oświadczeniach i pokrywa się z opisem zakresu pracy habilitacyjnej w autoreferacie Pani dr inż. Ireny Sielamowicz. Istotnym i indywidualnym osiągnięciem Pani dr inż. Ireny Sielamowicz jest w moim przekonaniu zaimplementowanie dwóch nowoczesnych metod badawczych, a mianowicie cyfrowej techniki obrazowania prędkości cząsteczek do pomiarów pól płynięcia materiałów ziarnistych w silosach oraz metody elementów dyskretnych do symulacji komputerowych zachowania się ośrodków ziarnistych w silosach. Umiejętność stosowania i wykorzystania wyników zaawansowanych technik doświadczalnych i koncepcji opisu teoretycznego zachowania się ośrodków ziarnistych w silosach stanowi istotne i wyróżniające osiągnięcie Pani dr inż. Ireny Sielamowicz. Szczegółowe wyniki kolejnych publikacji zestawu habilitacyjnego Pani dr inż. Ireny Sielamowicz potwierdziły pełną przydatność i wzajemną komplementarność obu metod badawczych analizy stanu deformacji i naprężenia w ośrodku ziarnistym w silosie. Zaproponowana przez Panią dr inż. Irenę Sielamowicz procedura komplementarnego stosowania tych dwóch procedur badawczych umożliwia uzyskanie rozwiązań kompletnych mechaniki ośrodków ziarnistych w małych i średnich silosach, ale też umożliwia ocenę i weryfikację założeń upraszczających przyjmowanych przez różnych autorów w rozwiązaniach przybliżonych jak i zaleceniach normowych stosowanych przy projektowaniu silosów. Uważam, że są to znaczące osiągnięcia w dziedzinie mechaniki, a zwłaszcza w zakresie mechaniki ośrodków ziarnistych w silosach.

### **Ocena dorobku naukowego**

Pani Irena Sielamowicz studiowała na Wydziale Budownictwa Lądowego Politechniki Białostockiej. Tytuł magistra inżyniera o specjalności technologii i organizacji budowy uzyskała w 1980 roku. Tytuł doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej budownictwa uzyskała na Politechnice Białostockiej w dniu 24 kwietnia 1991 roku na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „Analiza płyty kołowo – symetrycznej na podłożu jednostronnym metodą elementów czasoprzestrzennych”, której promotorem był prof. Zbigniew Kączkowski.



Dorobek naukowy Pani Ireny Sielamowicz przed doktoratem obejmuje, łącznie z rozprawą doktorską 8 prac z zakresu budownictwa opublikowanych w czasopismach branżowych i wydawnictwach Politechniki Białostockiej w latach 1983 – 1991. W latach 80. Pani Irena Sielamowicz uczestniczyła w realizacji czterech ekspertyz i zleceń z zakresu budownictwa, których wyniki zostały opublikowane w raportach Politechniki Białostockiej.

Dorobek naukowy Pani dr inż. Ireny Sielamowicz po doktoracie obejmuje łącznie 31 publikacji naukowych, w tym 13 publikacji stanowiących zestaw rozprawy habilitacyjnej szczegółowo omówionych w poprzednim punkcie niniejszej recenzji. W tym zestawie 13 publikacji habilitacyjnych, dziewięć opublikowano w wysoko punktowanych czasopismach z listy filadelfijskiej. Drugą grupę stanowi dziesięć publikacji naukowych z zakresu mechaniki ośrodków ziarnistych w silosach, ale nie włączonych do zestawu prac habilitacyjnych, z których pięć opublikowano w wysoko punktowanych czasopismach z listy filadelfijskiej, w tym trzy prace opublikowano w monograficznych wydawnictwach Springera (2005 i 2007) oraz A.A. Balkema (2005). Pozostałą grupę ośmiu prac o charakterze popularyzatorskim opublikowano w lokalnych czasopismach branżowych i wydawnictwach politechnicznych. Pani dr inż. Irena Sielamowicz jest autorką zgłoszenia patentowego z 1999 roku Nr P 331912 pt. „Komora silosu przeznaczonego zwłaszcza do magazynowania materiałów i surowców ziarnistych rozdrobnionych i sypkich”. Do pełnego kompletu trzeba jeszcze dodać 5 ekspertyz i raportów z badań, w których Pani dr inż. Irena Sielamowicz brała udział w trakcie rocznego stypendium w Szwajcarii.

Istotnym uzupełnieniem dorobku publikacyjnego Pani dr inż. Ireny Sielamowicz jest obszerny wykaz jej prac konferencyjnych obejmujący 38 pozycji, z czego 28 prac dotyczy konferencji zagranicznych, a 10 konferencji w kraju.

Udział Pani dr inż. Ireny Sielamowicz w licznych międzynarodowych konferencjach to przede wszystkim upowszechnianie wyników własnych badań z zakresu mechaniki ośrodków ziarnistych, ale również systematyczne zdobywanie uznania w środowisku światowych autorytetów z tej dziedziny, co potwierdzone jest, załączonymi do materiałów habilitacyjnych, listami referencyjnymi czterech wybitnych specjalistów. Dwa z tych listów są kolejno, zaproszeniem na spotkanie (2008), a następne (2010) potwierdzeniem wyboru Pani dr inż. Ireny Sielamowicz do Grupy Roboczej Mechaniki Ciał Rozdrobnionych Europejskiej Federacji Inżynierii Chemicznej podpisanym przez jej Przewodniczącego Prof. Massimo Poletto. Dwa następne listy, podpisane przez Prezydenta firmy Jenike&Johanson – Prof. Johna W. Carsona oraz przez Prof. Francisco Ayuga Telleza z Uniwersytetu Technicznego w Madricie, są potwierdzeniem uznania wysokiej rangi Pani dr inż. Ireny Sielamowicz jako specjalistki w dziedzinie płynięcia materiałów ziarnistych oraz podziękowaniem za Jej recenzje dwóch prac doktorskich. Piąty z listów referencyjnych, podpisany przez Timothy A. Bella z grupy badań firmy DuPont podkreśla wysoką wartość prac Pani dr inż. Ireny Sielamowicz, przyznanie Jej w 2004 roku stypendium badawczego firmy DuPont oraz Jej wybór na członka 30 osobowej Grupy Roboczej Mechaniki Ciał Rozdrobnionych Europejskiej Federacji Inżynierii Chemicznej. Pani dr inż. Irena Sielamowicz jest jedynym przedstawicielem z Polski w tym specjalistycznym gremium.

W latach 1981 – 2010 Pani dr inż. Irena Sielamowicz pracowała na Wydziale Budownictwa na Politechnice Białostockiej, najpierw jako asystent, a po obronie pracy doktorskiej jako adiunkt. Jest współautorką trzech podręczników akademickich, dwóch z wytrzymałości materiałów wydanych w 2008 roku i jednego z zakresu stanów sprężysto – plastycznych i nośności granicznej układów prętowych z 2011 roku. Była promotorem siedmiu prac dyplomowych oraz opiekunem praktyk studenckich. Wielokrotnie otrzymała nagrodę Rektora Politechniki Białostockiej (1991, 1998, 1999, 2005 i 2007).

Pani dr inż. Ireny Sielamowicz była członkiem komitetów organizacyjnych konferencji naukowych, jest też członkiem trzech krajowych towarzystw naukowych. Pani dr inż. Irena Sielamowicz wielokrotnie powoływana była na recenzenta prac kierowanych do międzynarodowych czasopism, w tym do Canadian Journal of Chemical Engineering, Journal of Food Engineering, International Symposium w

Tromso w Norwegii. Recenzowała też dwie, wspomniane wcześniej, prace doktorskie dla Technicznego Uniwersytetu w Madrycie w 2006 i 2010 roku. Pani dr inż. Irena Sielamowicz uzyskała status eksperta i recenzenta wielu programów badawczych i instytucji finansujących badania, w tym w trzech programach 7 Programu Ramowego UE, w Komitecie Badań Naukowych i Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Ministerstwie Rozwoju Regionalnego, Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości, Narodowym Centrum Badań i Rozwoju, Polsko Norweskim Funduszu Badań Naukowych i w Narodowym Programie Foresight Polska 2020.

Pani dr inż. Irena Sielamowicz uczestniczyła w realizacji wielu projektów badawczych, krajowych i międzynarodowych. Była kierownikiem dwóch projektów badawczych finansowanych przez Ministerstwo Nauki, pierwszy Nr 7 T07E 025 09 (1995 – 1996) dotyczył analizy problemów wyznaczania ciśnień w modelu silosu metodą elementów czasoprzestrzennych, drugi Nr 4 T07E 054 30 (2006 – 2008) dotyczył techniki DPIV w zastosowaniu do rejestracji płynięcia materiałów granulowanych i pomiarów ciśnień na ścianie model silosu.

Zgodnie z danymi z bazy Journal Citation Reports ISI z dnia 14-12-2011 prace Pani dr inż. Ireny Sielamowicz były cytowane 44 razy, a indeks Hirscha wynosi 4. Cztery najczęściej cytowane prace zestawu rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz to poz. 9 – 13, poz. 7 – 11, poz. 4 – 9 i poz. 8 – 7.

### **Wniosek końcowy**

Z zamieszczonej wyżej oceny dorobku naukowego Pani dr inż. Ireny Sielamowicz wynikają jej uznane w środowisku akademickim na świecie osiągnięcia naukowe w zakresie mechaniki ośrodków ziarnistych w silosach. Wyniki tych prac są należycie upowszechnione w publikacjach naukowych w czasopiśmie zagranicznych i krajowych o uznanej randze, w tym w znacznej części w wysoko punktowanych czasopiśmie z tzw. Listy filadelfijskiej.

Rozprawa habilitacyjna Pani dr inż. Ireny Sielamowicz na temat analizy płynięcia materiałów granulowanych w modelach silosów została przedstawiona w postaci zbioru 13 publikacji, w tym czterech samodzielnych i dziewięciu współautorskich. Wkład poszczególnych autorów został jednoznacznie określony w ich indywidualnych oświadczeniach i w autoreferacie Pani dr inż. Ireny Sielamowicz. Tematyka rozprawy habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz jest bez wątpienia jednym z ważniejszych problemów współczesnej techniki i mimo intensywnie prowadzonych badań na całym świecie proces płynięcia ośrodków ziarnistych w silosach wciąż nie jest w pełni poznany. Zastosowane w rozprawie habilitacyjnej Pani dr inż. Ireny Sielamowicz techniki badawcze, doświadczalne i obliczeniowe, umożliwią uzyskanie pełnego opisu kinematyki i statyki ośrodków ziarnistych w silosach, a uzyskane wyniki umożliwią ocenę i weryfikację założeń upraszczających przyjmowanych w rozwiązaniach przybliżonych jak i zaleceniach normowych stosowanych przy projektowaniu silosów. Uważam, że są to znaczące osiągnięcia w dziedzinie mechaniki, a zwłaszcza w zakresie mechaniki ośrodków ziarnistych w silosach.

Uważam, że zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 (Dz. U. nr 65, poz. 595, z późn. zm. Dz. U. z 2005 r. Nr 164, poz. 1365, z 2010 r. Nr 96, poz. 620 i Nr 182, poz. 1228 oraz z 2011 r. Nr 84, poz. 455), praca stanowi znaczny wkład do rozwoju nauki w zakresie mechaniki. Uwzględniając powyższe zgodnie z przedłożoną oceną dorobku naukowego i rozprawy habilitacyjnej stawiam wniosek o dopuszczenie Pani dr inż. Ireny Sielamowicz do kolokwium habilitacyjnego przed Radą Naukową Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

