



POLITECHNIKA
GDAŃSKA

MACIEJ NIEDOSTATKIEWICZ

BADANIA DEFORMACJI
W MATERIAŁACH SYPKICH
PODCZAS
DYNAMICZNEGO PRZEPIŁYWU
W SILOSACH

GDAŃSK 2014

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Janusz T. Cieśliński

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

REDAKTOR SERII

Jerzy M. Sawicki

RECENZENCI

Danuta Leśniewska

Magdalena Rucka

PROJEKT OKŁADKI

Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna na stronie
www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog
zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.gda.pl

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2014

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978-83-7348-524-2

SPIS TREŚCI

WYKAZ OZNACZEŃ	7
1. WPROWADZENIE	11
1.1. Problematyka badawcza przepływu materiałów sypkich w silosach	11
1.2. Cel i zakres pracy	18
2. PRZEGLĄD LITERATURY	21
2.1. Badania doświadczalne lokalizacji odkształceń w materiałach sypkich	21
2.2. Nowoczesne bezinwazyjne techniki pomiarowe lokalizacji odkształceń oraz zmian koncentracji materiału sypkiego	30
2.2.1. Metoda <i>Particle Image Velocimetry</i> (PIV)	30
2.2.2. Metoda <i>Electrical Capacitance Tomography</i> (ECT)	32
2.2.3. Metoda <i>Particle Image Thermography</i> (PIT)	37
2.3. Efekty dynamiczne w silosach	37
2.3.1. Eksperymenty w silosach	37
2.3.2. Przyczyny powstawania efektów dynamicznych	40
2.3.3. Metody redukcji efektów dynamicznych	44
2.4. Numeryczne modelowanie materiału sypkiego	45
2.4.1. Teoretyczne modele przepływu materiału sypkiego	45
2.4.2. Zastosowanie metody elementów dyskretnych w symulacji przepływu materiału sypkiego w silosie	47
3. INWAZYJNE POMIARY ZMIAN ODKSZTAŁCEŃ W MATERIAŁACH SYPKICH	51
3.1. Opis metody pomiarowej	51
3.2. Model ściany oporowej	51
3.2.1. Stanowisko badawcze	51
3.2.2. Wyniki doświadczeń	53
3.2.3. Ocena dokładności pomiarów	56
3.3. Model silosu prostokątnego	56
3.3.1. Stanowisko badawcze	56
3.3.2. Wyniki doświadczeń	61
3.3.3. Ocena dokładności pomiarów	72
3.4. Podsumowanie wyników doświadczeń i wnioski szczegółowe	73
4. BEZINWAZYJNE POMIARY ZMIAN ODKSZTAŁCEŃ W MATERIAŁACH SYPKICH METODĄ PROMIENIOWANIA RENTGENOWSKIEGO (RTG)	74
4.1. Opis metody pomiarowej	74
4.2. Model ściany oporowej	78
4.2.1. Stanowisko badawcze	78
4.2.2. Wyniki doświadczeń	80
4.2.3. Ocena dokładności pomiarów	83
4.3. Model silosu prostokątnego	83
4.3.1. Opis stanowiska badawczego	83
4.3.2. Wyniki doświadczeń	85
4.3.3. Ocena dokładności pomiarów	109
4.4. Podsumowanie wyników doświadczeń i wnioski szczegółowe	110
5. BEZINWAZYJNE POMIARY ZMIAN ODKSZTAŁCEŃ W MATERIAŁACH SYPKICH METODĄ <i>PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY</i> (PIV)	112
5.1. Opis metody pomiarowej	112

5.2. Model ściany oporowej	118
5.2.1. Stanowisko badawcze	118
5.2.2. Wyniki doświadczeń	122
5.2.3. Ocena dokładności pomiarów	139
5.3. Model silosu prostokątnego	149
5.3.1. Stanowisko badawcze	149
5.3.2. Wyniki doświadczeń	150
5.3.3. Ocena dokładności pomiarów	162
5.4. Podsumowanie wyników doświadczeń i wnioski szczegółowe	172
6. BEZINWAZYJNE POMIARY ZMIAN ODKSZTAŁCEŃ W MATERIAŁACH SYPKICH METODĄ <i>ELECTRICAL CAPACITANCE TOMOGRAPHY</i> (ECT)	174
6.1. Opis metody pomiarowej	174
6.2. Model silosu prostokątnego	181
6.2.1. Stanowisko badawcze	181
6.2.2. Wyniki doświadczeń	186
6.2.3. Ocena dokładności pomiarów	194
6.3. Model silosu cylindrycznego	206
6.3.1. Stanowisko badawcze	206
6.3.2. Wyniki doświadczeń	209
6.3.3. Ocena dokładności pomiarów	225
6.4. Podsumowanie wyników doświadczeń i wnioski szczegółowe	235
7. BEZINWAZYJNE POMIARY ZMIAN ODKSZTAŁCEŃ W MATERIAŁACH SYPKICH METODĄ <i>PARTICLE IMAGE THERMOGRAPHY</i> (PIT)	239
7.1. Opis metody pomiarowej	239
7.2. Model silosu cylindrycznego	240
7.2.1. Stanowisko badawcze	240
7.2.2. Wyniki doświadczeń	242
7.2.3. Ocena dokładności pomiarów	246
7.3. Podsumowanie wyników doświadczeń i wnioski szczegółowe	247
8. POMIARY NAPORU MATERIAŁÓW SYPKICH NA DNO SILOSÓW	248
8.1. Napór materiału sypkiego na dno silosu podczas przepływu kontrolowanego	248
8.2. Model silosu cylindrycznego	248
8.2.1. Stanowisko badawcze	248
8.2.2. Wyniki doświadczeń	250
8.2.3. Ocena dokładności pomiarów	258
8.3. Podsumowanie wyników doświadczeń i wnioski szczegółowe	258
9. EFEKTY DYNAMICZNE W SILOSACH	259
9.1. Współczesne koncepcje powstawania efektów dynamicznych	259
9.2. Model silosu cylindrycznego	268
9.2.1. Stanowisko badawcze	268
9.2.2. Wyniki doświadczeń	270
9.2.3. Ocena dokładności pomiarów	291
9.3. Podsumowanie wyników doświadczeń i wnioski szczegółowe	292
10. REDUKCJA EFEKTÓW DYNAMICZNYCH	293
10.1. Klasyfikacja metod redukcji	293
10.2. Model silosu cylindrycznego	294
10.2.1. Stanowisko badawcze	294
10.2.2. Wyniki doświadczeń	295
10.2.3. Ocena dokładności metod redukcji	308
10.3. Podsumowanie wyników doświadczeń i wnioski szczegółowe	309

11. NUMERYCZNE MODELOWANIE MATERIAŁU SYPKIEGO PODCZAS PRZEPLYWU W SILOSIE PROSTOKĄTNYM	311
11.1. Założenia metody <i>Discrete Element Method</i> (DEM)	311
11.2. Wyniki obliczeń	317
11.3. Ocena dokładności metody obliczeniowej	332
11.4. Podsumowanie wyników obliczeń i wnioski szczegółowe	335
12. PODSUMOWANIE	337
12.1. Uwagi końcowe	337
12.2. Kierunki dalszych badań	338
BIBLIOGRAFIA	341
Streszczenie w języku polskim	369
Streszczenie w języku angielskim	370