

ANALIZA TEORETYCZNA I DOŚWIADCZALNA ROZKŁADÓW PÓL  
TEMPERATURY W OŚRODKU ZIARNISTYM SKŁADOWANYM  
W MODELU SILOSU\*

*Jolanta Anna Prusiel*

Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,  
Politechnika Białostocka  
ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok  
e-mail: j.prusiel@pb.edu.pl

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki analizy teoretycznej i doświadczalnej dotyczące rozkładów pól temperatury i wilgoci w ścianie komory silosowej wypełnionej ośrodkiem ziarnistym (organicznym i nieorganicznym). Badania doświadczalne przeprowadzono na siatkobetonowym modelu komory silosowej wypełnionym ośrodkiem organicznym (gorczycą) i obciążonym temperaturą w warunkach osiowej symetrii. Autorskim programem numerycznym TEMPERATURA wykonano wielowariantowe testy dla trzech różnych ośrodków ziarnistych, tj. gorczycy, pszenicy i piasku. Porównano wyniki analizy teoretycznej i badań doświadczalnych. Na podstawie obliczeń numerycznych określono grubość warstwy przyściennej ośrodka, na której zachodzi tłumienie przepływu strumienia ciepła. Uwzględnienie warstwy tłumiącej ośrodka sypkiego przy obliczaniu gradientu temperatury na grubości ściany silosu znacznie wpływa na zmniejszenie momentów zginających w ścianie wywołanych obciążeniem termicznym.

**Słowa kluczowe:** model silosu, ośrodek ziarnisty, temperatura, wilgotność

WSTĘP

Oddziaływania termiczne w żelbetowych silosach wypełnionych materiałem ziarnistym sprzężone są z migracją wilgoci, pochodzącą z otaczającego powietrza, opadów atmosferycznych, czy podwyższonej wilgotności składowanego ośrodka. Wzrost temperatury i zmiana wilgotności ziarna prowadzą do nadmiernej jego rozszerzalności, wywołuje dodatkowe parcie na ściany komory silosowej. Blight w swoich pracach (1986, 1995) przedstawił wyniki badań, które po-

---

\*Artykuł opracowano na Politechnice Białostockiej w ramach Pracy Statutowej S/WBiŚ/2/2008.

kazały, że parcie poziome zawilgoconego ziarna w stalowym silosie może wzrosnąć nawet dwukrotnie z powodu pęcznienia ograniczonego ścianami. Ponadto w silosie występują niekorzystne dla konstrukcji oddziaływania wywołane absorpcją wilgoci przez ziarno. Okazuje się, że nawet bez lokalnych przecieków wody, zawartość wilgoci w ziarnie może wzrosnąć ponad dopuszczalny poziom. Większość autorów prac badawczych, zajmujących się problemami składowania ziarna (pszenicy i żyta) w silosach, ogranicza maksymalną jego wilgotność przy składowaniu do 14,5-15,5% (Kazakov i Kretovič 1989), aby zabezpieczyć się przed infekcją grzybów i innymi niekorzystnymi efektami procesów biologicznych, np. samonagrzewem zboża. W eksploatowanych elewatorach zbożowych przy wilgotności względnej powietrza w granicach 40-90%, wilgotność zboża może zmieniać się od 11 nawet do 22% masy suchego ziarna. Wraz ze zmianą wilgotności ulegają zmianie właściwości fizyczne zboża, takie jak: gęstość nasypowa, kąt tarcia wewnętrznego, współczynnik tarcia o powierzchnię materiału konstrukcji, moduł sprężystości ośrodka sypkiego (Horabik i Molenda 2003). Wartości tych właściwości są istotne przy projektowaniu procesów technologicznych związanych z magazynowaniem i przetwarzaniem ziarna oraz uwzględnia się je w obliczeniach konstrukcji silosów.

Przeгляд stanu wiedzy w zakresie stanów naprężeń w żelbetowych ścianach silosów pod wpływem oddziaływań klimatycznych wskazuje, że nieliczne są wyniki badań doświadczalnych na modelach silosu i obiektach w skali naturalnej. Przykładowo były prowadzone badania doświadczalne na modelach silosów, głównie o płaszczach metalowych (z blachy stalowej, aluminium), dotyczące oddziaływań termicznych opisane w pracach (Manbeck i Muzzelo 1985), (Zhang i in. 1987). Zhang i in. zbadali zmianę wartości ilorazu naporu poziomego i pionowego pod wpływem obciążeń statycznych i termicznych w zbiornikach o różnej smukłości. Z kolei na Politechnice Białostockiej wykonano badania na siatkobetonowym modelu silosu w celu określenia efektów (redystrybucji naprężeń w ścianie komory) wywołanych sprzężeniem parcia statycznego i pól temperatury (Łapko i in. 2003). Natomiast badaniem wpływu zmiany wilgotności i temperatury ziarna zbóż na napór poziomy w metalowym modelu silosu zajmowała się Kusińska (2002).

Dlatego też niezbędne jest poszukiwanie odpowiednio zweryfikowanych modeli teoretycznych, które pozwolą uściślić opis oddziaływań termiczno-wilgotnościowych sprzężonych z grawitacyjnym parciem ośrodka sypkiego. W efekcie takiego sprzężenia ma miejsce redystrybucja sił wewnętrznych w przekrojach elementów konstrukcyjnych silosów. Wyjaśnienie zakresu tej redystrybucji uściśli założenia obliczeniowe do projektowania żelbetowych silosów, podwyższając ich trwałość i niezawodność eksploatacyjną oraz zdolność do ochrony ziarna przed zawilgoceniem.

## BADANIA DOŚWIADCZALNE NA MODELU SILOSU

Badania przeprowadzono na siatkobetonowym modelu komory silosowej o wymiarach: wysokość  $H = 2,5$  m, średnica  $D = 0,8$  m i gr. ścianki 14 mm. Model wypełniony ośrodkiem organicznym (gorczycą) obciążono temperaturą w warunkach osiowej symetrii. Cały cykl badania podzielono na dwie fazy:

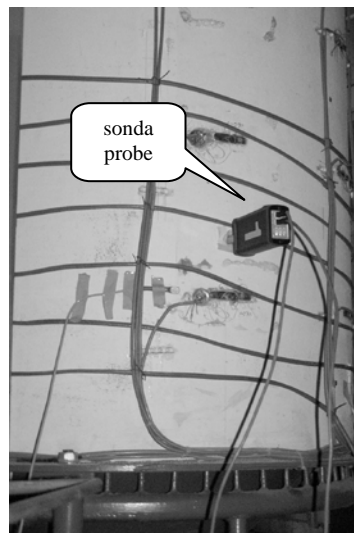
- faza ogrzewania „OG” – przyrost temperatury na zewnętrznej powierzchni komory silosu w zakresie 14,9-50,6°C,
- faza chłodzenia „CH” – spadek temperatury na zewnętrznej powierzchni komory silosu w zakresie 50,6-14,6°C.

Ogrzanie ścianki komory i materiału ziarnistego zrealizowano poprzez zastosowanie elektrycznego systemu grzewczego z wykorzystaniem przewodów grzejnych typu ELEKTRA o zakresie temperatury do +70°C. Przewód grzejny zamocowano spiralnie (skok ok. 10 cm) na zewnętrznej powierzchni modelu w jego dolnej części na wysokości około 70 cm. Faza ogrzewania trwała 26 h, natomiast faza chłodzenia odbywała się w warunkach naturalnych i wyniosła 67 h.

Model silosu na stanowisku badawczym pokazano na rysunku 1.

Podczas eksperymentu mierzono następujące wielkości fizyczne:

- temperaturę na powierzchni ścianki i w ośrodku ziarnistym,
- wilgotność ścianki i w przestrzeni między ziarnami materiału.



**Rys. 1.** Fragment modelu silosu na stanowisku badawczym

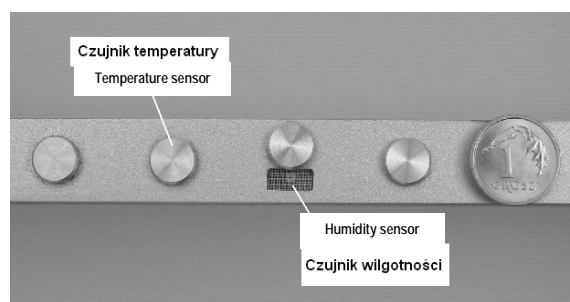
**Fig. 1.** A fragment of silo model on the test stand

Do pomiaru temperatury i wilgotności w ścianie modelu oraz w ośrodku ziarnistym wykorzystano wielokanałowy system (rys. 2), w skład którego wchodzi dwie wielopunktowe sondy pomiarowe o długości 520 mm (26 czujników pomiaru temperatury i 6 czujników pomiaru wilgotności). Sondy umieszczono w modelu silosu na wysokości 330 mm (rys. 1). Sondy w sposób ciągły odczytywały temperaturę i wilgotność, a wyniki były rejestrowane w komputerze, co jest bardzo istotne przy badaniach długotrwałych. Otrzymano w ten sposób niestacjonarne rozkłady pól temperatury i wilgoci w ścianie oraz ośrodku ziarnistym (gorzycy). Natomiast przyrost i spadek temperatury na zewnętrznej powierzchni ścianki modelu rejestrowano w czterech punktach na obwodzie (T1, T2, T3, T4) za pomocą systemu telemetrycznego Sononet. Wyniki badań doświadczalnych na siatkobetonowym modelu silosu przedstawiono szerzej w pracy (Prusiel i Łapko 2007).

a)



b)



**Rys. 2.** Wielokanałowy system do pomiaru temperatury i wilgotności w ośrodkach sypkich:

a) widok ogólny, b) czujniki temperatury i wilgotności

**Fig. 2.** Multi channel system of temperature and humidity registration in bulk solids:

a) general view, b) temperature and humidity sensors

Uzyskane z eksperymentu niestacjonarne pola temperatury i wilgotności w siatkobetonowej ścianie modelu przyjęto do analizy teoretycznej.

ANALIZA TEORETYCZNA ROZKŁADÓW PÓL  
TERMICZNO-WILGOTNOŚCIOWYCH W ŚCIANIE MODELU SILOSU  
I OŚRODKU ZIARNISTYM

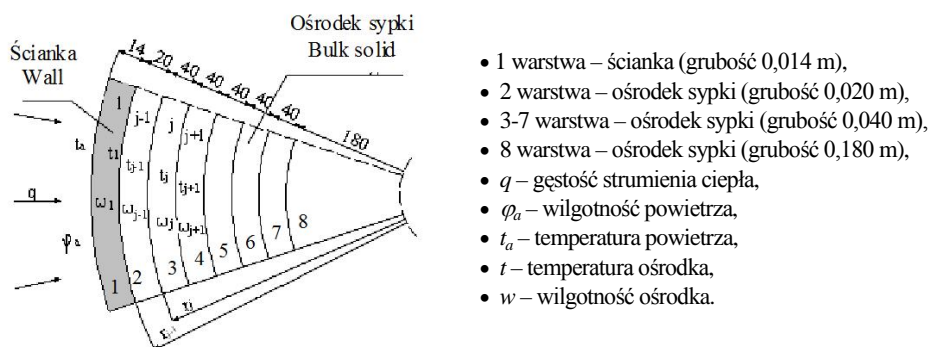
**Założenia do obliczeń**

Modelowanie teoretyczne rozkładów pól temperatury i wilgotności w modelu silosu przeprowadzono autorskim programem numerycznym TEMPERATURA (w ujęciu metody różnic skończonych), który został opracowany w ramach współpracy naukowej z Państwowym Uniwersytetem Technicznym w Brześciu. W programie wykorzystano podstawowe zależności wynikające z technicznej teorii niestacjonarnych przepływów ciepła w zadaniach kontaktowych ciał stałych (metoda elementarnych bilansów cieplnych Waniczewa (Vanichev 1946)) oraz złożone modele matematyczne opisujące zjawisko przenoszenia wilgoci w ośrodku ziarnistym. Program umożliwia obliczanie rozkładów pól temperatury i wilgotności w walcowych żelbetonowych silosach w warunkach stacjonarnego (stała temperatura i wilgotność środowiska) i niestacjonarnego (dowolnie zmienna temperatura i wilgotność otoczenia) przepływu ciepła i wilgoci. Zaproponowany w programie model matematyczny może być zastosowany do oceny stanu wilgotnościowego ziaren zbóż składowanych w silosach i magazynach. Stan wilgotnościowy materiału ziarnistego sprzężony z polami temperatur można wykorzystać do analizy odkształceń i naprężeń w konstrukcjach silosowych. Program zakupiono i wdrożono w Katedrze Konstrukcji Budowlanych Politechniki Białostockiej. Założenia programu i wyniki obliczeń numerycznych prezentowano w pracach (Prusiel i Nikitin 2006), (Prusiel i Łapko 2007), (Prusiel i Nikitin 2008).

W założeniach programu rozwiązanie dla cylindrycznej komory silosu ograniczono do zagadnienia osiowo-symetrycznego. Siatkobetonową ściankę silosu wraz z wypełniającym ją ośrodkiem sypkim zamodelowano jako zespół powierzchni cylindrycznych o zadanej grubości, mającymi wspólną oś. Model teoretyczny przyjęty w programie TEMPERATURA przedstawiono na rysunku 3.

Przyjęto 8 warstw podstawowych, a każdą warstwę podstawową podzielono na 11 warstw elementarnych (razem 88 warstw).

Analizę teoretyczną rozkładów pól termiczno-wilgotnościowych przeprowadzono dla dwóch ośrodków organicznych (gorczycy i pszenicy) oraz ośrodka nieorganicznego (piasku). W tabeli 1 zamieszczono właściwości fizyczne materiałów ziarnistych przyjętych do obliczeń numerycznych.



**Rys. 3.** Założenia przyjęte do analizy teoretycznej  
**Fig. 3.** Assumptions adopted for theoretical analysis

**Tabela 1.** Właściwości materiałów ziarnistych przyjętych do analizy teoretycznej  
**Table 1.** Properties of granular materials assumed for theoretical analysis

Właściwości materiałów Properties of granular materials	Gorzycza Mustard seeds	Pszenica Wheat	Piasek średni Medium-grain sand
Przewodność cieplna Thermal conductivity ( $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ )	$0,186 + 0,002w$	$0,10 + 0,002w$	$0,4 + 0,058w$
Pojemność cieplna Heat capacity ( $kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ )	$1,026 + 0,042w$	$1,46 + 0,042w$	$0,84 + 0,042w$
Paroprzepuszczalność Vapour permeability ( $g \cdot (m \cdot h \cdot kPa)^{-1}$ )	0,082	0,045	0,165
Prędkość kapilarnego podciągania Velocity of capillary suction ( $mm \cdot h^{-1}$ )	0,072	0,072	0,072
Gęstość objętościowa Bulk density ( $kg \cdot m^{-3}$ )	730	800	1650

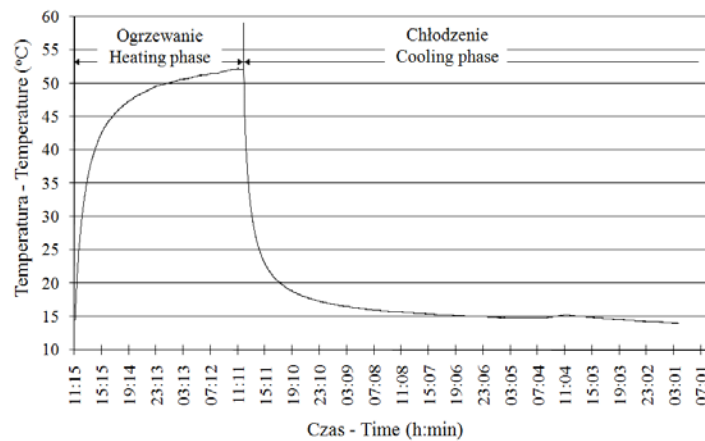
$w$  – wilgotność materiału – moisture content of material.

### Wyniki obliczeń numerycznych i ich analiza

Wykonano wielowariantowe testy numeryczne dla trzech ośrodków ziarnistych, zakładając zmienną temperaturę ścianki modelu silosu oraz zmienną lub stałą wilgotność ścianki. W celu porównania wyników analizy teoretycznej i rezultatów badań doświadczalnych przyjęto do obliczeń z eksperymentu następujące warunki termiczno-wilgotnościowe:

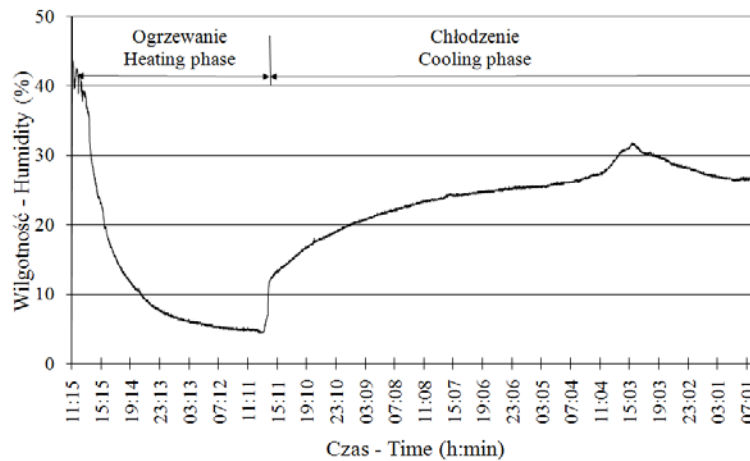
- zmienna temperatura ścianki T4 zarejestrowana na powierzchni ścianki w pobliżu sondy 1 (rys. 4),

- zmienna wilgotność ścianki zmierzona sondą wielopunktową w środku ścianki (rys. 5),
- początkowa wilgotność ośrodka sypkiego  $w = 9,1\%$ , wyznaczona metodą wagową dla gorczycy.



**Rys. 4.** Rozkład temperatury na zewnętrznej powierzchni ścianki modelu silosu wypełnionego gorczycą w fazie ogrzewania i chłodzenia (Prusiel i Łapko 2007)

**Fig. 4.** Temperature changes on the external wall surface during the heating and cooling phase of the silo bin model filled with white mustard seeds (Prusiel and Łapko 2007)



**Rys. 5.** Rozkład wilgotności w środku ścianki modelu silosu wypełnionego gorczycą w fazie ogrzewania i chłodzenia (Prusiel i Łapko 2007)

**Fig. 5.** Humidity changes in the centre of the silo wall structure during the heating and cooling phases of the silo model filled with white mustard seeds (Prusiel and Łapko 2007)

Przeprowadzono obliczenia dla całego cyklu badania (faza ogrzewania i chłodzenia), przyjmując całkowity czas modelowania 3 dni 16 h. Faza ogrzewania trwała 1 dzień 2 h, natomiast faza chłodzenia 2 dni 14 h. Ponadto w wybranych testach założono podwyższoną wilgotność ośrodka sypkiego ( $w = 20\%$ ) w warstwie przyściennej na grubości 20 mm i 100 mm. Początkową wilgotność siatkobetonowej ścianki modelu przyjęto 4%. Łącznie wykonano 12 testów obliczeniowych, po 4 dla każdego ośrodka.

Na podstawie przeprowadzonych testów dokonano analizy jakościowej i ilościowej otrzymanych rozkładów pól temperatury i wilgoci w ścianie modelu i ośrodku sypkim. Wybrane rezultaty obliczeń numerycznych przedstawiono w postaci tabel i wykresów poniżej.

W tabeli 2 zestawiono temperatury w ścianie modelu w wybranych chwilach czasowych cyklu. Można zauważyć, że występują różnice w wartościach temperatury w modelu z materiałem organicznym i nieorganicznym. Dla ośrodków organicznych (gorczyca, pszenica) wartości temperatur są znacznie wyższe w fazie ogrzewania (około 19%) od wartości temperatur otrzymanych dla modelu z piaskiem średnim. Materiał nieorganiczny ma mniejszą pojemność cieplną. Natomiast rozkłady pól temperatury w ścianie modelu z gorczycą i modelu z pszenicą są porównywalne.

**Tabela 2.** Temperatury uzyskane z analizy teoretycznej w ścianie modelu silosu dla trzech ośrodków ziarnistych

**Table 2.** Temperature obtained from theoretical analysis in the silo wall for three granular solids

Czas – Time	Temperatura – Temperature (°C)			
	Materiał – Material	Gorczyca – Mustard seeds	Pszenica – Wheat	Piasek średni – Sand
0d:00h:00m		15,60	15,60	15,60
0d:12h:00m		44,20	45,02	37,39
1d:00h:00m		46,90	47,70	40,15
1d:02h:00m		33,39	33,57	31,07
1d:12h:00m		18,78	18,82	18,47
2d:00h:00m		16,52	16,73	16,28
3d:00h:00m		15,68	15,85	15,65
3d:16h:00m		14,70	14,76	14,95

W tabeli 3 zamieszczono wartości wilgotności w modelu silosu wypełnionym pszenicą uzyskane z testu numerycznego, w którym zamodelowano podwyższoną wilgotność warstwy przyściennej zboża ( $w = 20\%$ ) na grubości 20 mm. Na podsta-



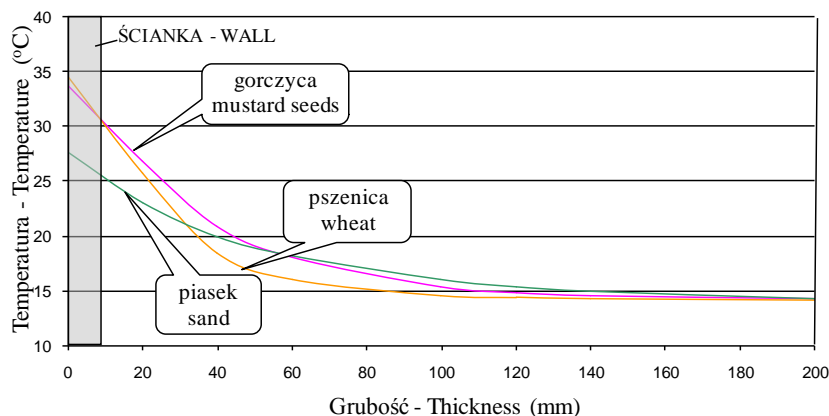
wie uzyskanych wyników można stwierdzić, że po 3 dobach cyklu obliczeniowego nadal utrzymuje się podwyższona wilgotność w warstwie przyściennej pszenicy.

**Tabela 3.** Wilgotności z analizy teoretycznej w ścianie modelu i pszenicy w wybranych warstwach elementarnych w czasie

**Table 3.** Humidity in the silo wall and wheat determined from theoretical analysis in the function of time in the selected elementary layers

Czas – Time	Wilgotność – Humidity (%)							
Odległość od osi ścianki (mm) Distance from the wall center	0	20	40	60	100	120	140	200
0d:00h:00m	4	20	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
1d:00h:00m	1,2	18,9	8,6	9,1	9,2	9,1	9,1	9,1
2d:00h:00m	1,2	18,4	8,5	8,8	9,1	9,1	9,1	9,1
3d:00h:00m	1,2	18,2	8,4	8,7	9,0	9,1	9,1	9,1
3d:16h:00m	1,1	18,1	8,3	8,6	9,0	9,0	9,1	9,1

Na rysunku 6 przedstawiono teoretyczne rozkłady pól temperatury na grubości ścianki i w warstwie przyściennej ośrodka (gorczycy, pszenicy, piasku) po 3 godzinach cyklu obliczeniowego. Obliczenia wykonano programem TEMPERATURA, przy założeniu niestacjonarnego przepływu ciepła i wilgoci (zmienna temperatura i wilgotność ścianki modelu).



**Rys. 6.** Teoretyczny rozkład pól temperatury na grubości ścianki i warstwy przyściennej ośrodka (gorczycy, pszenicy, piasku)

**Fig. 6.** Theoretical distribution of temperature fields on the silo wall thickness and the contact layer of grain (mustard seeds, wheat, sand)

### Porównanie wyników badań doświadczalnych i teoretycznych

Do porównania rezultatów badań doświadczalnych i teoretycznych wybrano test obliczeniowy dla modelu z gorczycą, w którym zamodelowano warunki brzegowe najbardziej zbliżone do eksperymentu. W tabeli 4 zestawiono doświadczalne wartości pól temperatury odczytane z wielopunktowej sondy do pomiaru temperatury z wynikami teoretycznymi uzyskanymi z programu numerycznego TEMPERATURA.

**Tabela 4.** Porównanie wyników badań doświadczalnych i teoretycznych w wybranych punktach pomiarowych dla modelu silosu wypełnionego gorczycą

**Table 4.** Comparison of theoretical and experimental results in the selected measuring points for silo model filled with mustard seeds

Czas – Time (d:h:m)		Temperatura w punktach pomiarowych Temperature in the measuring points (°C)							
		Odległość od osi ścianki – Distance from the wall center (mm)							
		0	20	40	60	100	120	140	200
0d:00h:00m	test – eksp.	15,6	14,9	14,9	14,9	14,6	14,4	14,4	14,2
0d:03h:00m	eksp.	36,6	31,0	25,9	21,0	16,2	15,2	14,7	14,2
	test	33,7	26,9	20,9	18,0	15,3	14,8	14,5	14,3
0d:12h:00m	eksp.	50,0	46,8	42,6	37,2	27,8	23,9	20,9	16,1
	test	44,2	38,2	32,3	28,6	22,8	20,7	18,9	15,6
1d:00h:00m	eksp.	53,4	51,8	48,7	44,4	36,6	32,7	29,3	21,8
	test	46,9	41,8	36,7	33,4	27,6	25,1	22,8	17,4
1d:02h:00m	eksp.	53,4	51,9	48,8	44,5	36,8	32,9	29,5	22,0
	test	33,4	34,9	34,7	33,0	28,0	25,5	23,2	17,6
2d:00h:00m	eksp.	18,4	19,9	22,0	23,3	26,0	26,7	27,0	25,8
	test	16,5	16,90	17,3	17,4	17,4	17,2	17,0	15,9
3d:00h:00m	eksp.	16,4	16,7	17,7	18,2	19,7	20,5	21,0	22,2
	test	15,7	15,6	15,5	15,5	15,4	15,4	15,4	15,2
3d:16h:00m	eksp.	15,8	15,9	16,8	16,9	18,0	18,4	18,9	20,1
	test	14,7	14,8	15,0	15,0	15,1	15,1	15,1	15,1

Z porównania rozkładów pól temperatury wynika, że największe rozbieżności wyników badań eksperymentalnych i teoretycznych występują w końcowej fazie ogrzewania (1d:02h:00m) w ścianie modelu silosu (około 37%) oraz w warstwie przysiennej ośrodka w odległości 40 mm od osi ścianki (około 29%). Natomiast najmniejsze różnice występują w początkowej fazie ogrzewania i końcowej fazie chłodzenia w warstwie kontaktowej gorczycy (około 100 mm od ścianki modelu) oraz w ścianie modelu. Różnice wynoszą od kilku do kilkunastu %.

## WNIOSKI

1. Na podstawie wyników uzyskanych z analizy teoretycznej rozkładów pól temperatury w materiale ziarnistym składowanym w modelu silosu wyznaczono grubość warstwy przyściennej tłumiącej strumień ciepła:

- dla gorczycy – 13 cm,
- dla pszenicy – 10 cm,
- dla piasku średniego – 20 cm.

Wyznaczone wartości są porównywalne z efektywną grubością warstwy przyściennej zalecaną przez polską normę silosową (PN-B-03262:2002), która wynosi:

- dla ziarnistych ośrodków sypkich – 12 cm,
- dla drobnoziarnistych i sproszkowanych ośrodków sypkich – 20 cm.

2. Uwzględnienie warstwy tłumiącej ośrodka sypkiego przy obliczaniu gradientu temperatury na grubości ściany silosu znacznie wpływa na zmniejszenie momentów zginających w ścianie wywołanych obciążeniem termicznym.

3. Wyniki analizy teoretycznej i doświadczalnej rozkładów pól temperatury w ziarnistym ośrodku sypkim składowanym w modelu silosu wykazały dość dobrą zbieżność. Małe różnice w wartościach temperatur stwierdzono w początkowej fazie ogrzewania w ośrodku sypkim oraz końcowej fazie chłodzenia w ścianie modelu i tuż przy niej. Natomiast pod koniec fazy chłodzenia zauważono szybszy spadek temperatury w gorczycy w obliczeniach teoretycznych niż w eksperymencie.

4. Z przeprowadzonych testów obliczeniowych przy stałej i zmiennej wilgotności ścianki komory silosu wynika, że zmiana wilgotności nie wpływa znacząco na rozkład pól temperatury w ośrodku sypkim.

5. Zamiast kosztochłonnych badań na elewatorach zbożowych można wykorzystać program numeryczny TEMPERATURA do wyznaczenia rozkładów pól temperatury w żelbetowych komorach silosów. Przy uwzględnieniu istotnych czynników charakteryzujących warunki klimatyczne i właściwości materiałów, wyniki obliczeń teoretycznych zweryfikowane doświadczalnie, mogą być wystarczająco dokładne dla potrzeb praktyki inżynierskiej.

## PIŚMIENNICTWO

- Blight G.E. , 1995. Effect of Moisture on Properties of Grain Stored in Silos. Bulk Solids Handling, Vol. 15(2), 209-213.
- Blight G.E., 1986. Swelling pressure of wetted grain. Bulk Solids Handling, Vol. 6, No. 6, 1135-1140.
- Horabik J., Molenda M., 2003. Właściwości fizyczne sypkich surowców spożywczych istotne w procesach magazynowania i przetwarzania. Wydania XII Konferencji Naukowo-Technicznej "Żelbetowe i sprężone zbiorniki na materiały sypkie i ciecze", Kraków, 89-96.

- Kazakov E.D., Kretovič V.L., 1989. Biohimija zerna i produktov ego pererabotki (in Russian). Agropromizdat.
- Kusińska E., 2002. Wpływ zawartości wody i temperatury ziarna na napór poziomy w modelowym silosie. Rozprawy Naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie, Wydział Techniki Rolniczej, Zeszyt 255, Lublin.
- Łapko A., Gnatowski M., Prusiel J.A., 2003. Analysis of some effects caused by interaction between bulk solid and r.c. silo wall structure. Powder Technology 133, nr1/3, International Journal, Elsevier Science B.V., Lausanne, Switzerland, 44-53.
- Manbeck H.B., Muzzelo L.M., 1985. Measurement of thermally induced pressures in a model grain bin. Transactions of the ASAE, vol. 28(4), 1253-1258.
- PN-B-03262:2002. Silosy żelbetowe na materiały sypkie. Obliczenia statyczne, projektowanie, wykonawstwo i eksploatacja.
- Prusiel J.A., Łapko A., 2007. Investigation of heat and moisture effects in silos containing agricultural bulk solids. Particle and Particle Systems Characterization, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim, Germany, 24(4/5), 284-290.
- Prusiel J.A., Nikitin W., 2006. Humidity state of grains stored in silos under conditions of isothermal moisture (in Polish). Zeszyty Naukowe PB, 27, Budownictwo, 261-272.
- Prusiel J.A., Nikitin W., 2008. Analiza stanu wilgotności i naprężeń w ścianach żelbetowych silosów. Przegląd Budowlany, 12, 53-56.
- Vanichev A.P., 1946. Proceedings of Academy of Science of SSR (in Russian). OTN, No.12.
- Zhang Q., Puri V.M., Manbeck H.B., Wang M.C., 1987. Finite element model for predicting static and thermally induced bin wall pressures. Transactions of the ASAE, 30(6), 1797-1806.

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THERMAL FIELDS DISTRIBUTION IN GRANULAR MEDIA STORED IN SILO MODEL

*Jolanta Anna Prusiel*

Faculty of Building Structures, Department of Building and Environmental Engineering,  
Białystok University of Technology  
ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok  
e-mail: j.prusiel@pb.edu.pl

**Abstract.** The paper presents the results of theoretical and experimental analysis concerning the distribution of temperature and moisture fields in the wall of a silo filled with granular mass (organic and non-organic). The experimental tests were conducted in a ferrocement model of a silo filled with agricultural grain (mustard seeds) and subjected to axi-symmetrical thermal actions. Also the multi-alternative numerical tests were elaborated with the use of a computer program developed by the authors, TEMPERATURE, for the three different particulate solids: mustard seeds, wheat and sand. The results of experimental and numerical tests were compared. On the basis of numerical computation the thickness of insulating layer of grain in contact with the silo wall was defined. Taking into account the damping layer of grain during the calculation for temperature gradient across the silo wall thickness, the realistic lesser values of thermal bending moments may be evaluated.

**Key words:** silo model, granular material, temperature, humidity