

METODA BADANIA ODKSZTAŁCALNOŚCI TERMICZNEJ ORGANICZNYCH OŚRODKÓW SYPKICH SKŁADOWANYCH W SILOSACH

Jolanta Anna PRUSIEL*, Andrzej ŁAPKO

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule opisano koncepcję stanowiska do wyznaczania liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej organicznych ośrodków sypkich oraz procedurę badawczą umożliwiającą określenie wyżej wymienionych właściwości ziarna składowanego w silosach, w warunkach rzeczywistego stanu naprężenia (konsolidacji ośrodka). Zagadnienie to ma duże znaczenie w silosach zbożowych z uwagi na możliwość wystąpienia zjawiska samonagrzewu ziarna. W artykule przedstawiono założenia teoretyczne zaproponowanej metody badawczej. Badanie należy przeprowadzić w modelowej komorze pomiarowej wyposażonej w płytę dociążającą próbkę ośrodka sypkiego oraz metalowy rdzeń umieszczony centrycznie w modelu umożliwiający nagrzewanie ośrodka sypkiego. Model stanowiska badawczego został zastrzeżony w Urzędzie Patentowym.

Słowa kluczowe: silos, ośrodek ziarnisty, odkształcalność termiczna ziarna.

1. Wprowadzenie

Rozszerzalność termiczna ośrodków rozdrobnionych jest wynikiem skomplikowanych efektów związanych z występowaniem w komorach silosowych pól termiczno-wilgotnościowych. Zjawisko rozszerzalności termicznej ośrodków ziarnistych może wpływać na wzrost sił wewnętrznych w ścianach komór silosowych przy założeniu, że współczynnik charakteryzujący tę rozszerzalność ośrodka sypkiego jest znacząco większy niż odpowiedni współczynnik materiału konstrukcyjnego ściany (stalowej lub żelbetowej). Ośrodek sypki, zwiększając poprzecznie swoją objętość, wywiera dodatkowe parcie na ścianę komory silosowej, której odkształcenia termiczne nie są w stanie zrekomensować przyrostu odkształceń rdzenia wypełniającego komorę. Literatura dotycząca analizowanego problemu jest bardzo skromna. W pracy Jakovleva i in. (1982), bez głębszego uzasadnienia podano, że współczynnik rozszerzalności termicznej ziarna zbóż jest 5-krotnie większy od odpowiedniego współczynnika dla ściany żelbetowej, co stwarza poważne zagrożenie awarią silosu w przypadku wystąpienia w masie ziarna procesu nazywanego „samonagrzewem”. W tym przypadku temperatura masy ziarna może wzrosnąć nawet do około 60°C. Natomiast w pracy Kazakova (Kazakov i Kretovič, 1989) poświęconej problematyce ośrodków ziarnistych wskazano, że zmiany wilgotności i temperatury ziarna mogą spowodować zmiany objętościowe masy sypkiej do 20% stanu wyjściowego. W pracach badawczych

z zakresu omawianego problemu można znaleźć propozycje procedury pomiaru współczynnika rozszerzalności materiałów w oparciu o metodę mikrokalorymetrii (Fortier i in., 1979), jednak sposób ten nie odpowiada warunkom, jakie występują przy składowaniu ośrodków ziarnistych w silosach. Normy projektowania konstrukcji silosowych: PN-EN 1991-4:2008 *Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 4: Silosy i zbiorniki* oraz norma australijska AS 3774, 1996 *Loads on bulk solids container* również nie podają jakichkolwiek informacji dotyczących współczynnika rozszerzalności termicznej ośrodków sypkich.

W pracy przedstawiono własną koncepcję stanowiska badawczego i procedury pomiarowej do wyznaczania tego współczynnika w komorze modelowej cylindrycznego silosu. Koncepcja ta została zastrzeżona w Urzędzie Patentowym RP (Łapko i Prusiel, 2011).

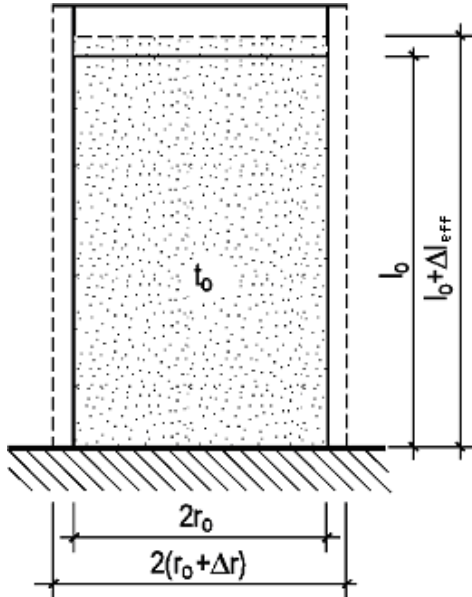
2. Założenia ogólne metody pomiarowej

Przy opracowaniu procedury badawczej przyjęto następujące założenia:

- pomiary zostaną wykonane na wybranych ośrodkach ziarnistych wysuszonych do stałej masy (o wilgotności rzędu 10%), a zatem pominięty będzie wpływ zmian wilgotności ośrodka na zmianę objętości;
- w celu pominięcia wpływu pełzania termicznego pomiary będą prowadzone na próbkach ziarna poddanych szybkim przyrostom pola temperatury;

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.prusiel@pb.edu.pl

- ze względów technicznych próbki ziarna będą znajdowały się w stanie ograniczonych odkształceń poprzecznych (zostaną umieszczone w cylindrze o sztywnej ściance);
 - pomiary będą wykonywane dla odpowiednio zagęszczonych próbek ośrodka sypkiego w warunkach odpowiadających składowaniu w silosach.
- Założono, że próbka ziarna zagęszczonego i wysuszonego do stałej masy umieszczona jest w cienkościennym naczyniu cylindrycznym (rys. 1).



Rys. 1. Model cylindrycznego silosu z próbką ziarna o temperaturze wyjściowej t_0

Zakładając, że temperatura ścianki cylindra i rdzenia ośrodka sypkiego (po jego uprzednim nagraniu) wzrośnie równomiernie o Δt , przy swobodnym odkształceniu płaszcza cylindra nastąpi przyrost jego promienia do wartości określonej równaniem:

$$r_o + \Delta r = r_o + \alpha_{tc} \Delta t r_o = r_o (1 + \alpha_{tc} \Delta t) \quad (1)$$

gdzie: α_{tc} jest współczynnikiem rozszerzalności cieplnej materiału ścianki cylindra, a r_o jest promieniem powierzchni środkowej płaszcza cylindra.

Wzór (1) zakłada, że przyrost promienia cylindra następuje wyłącznie z tytułu nagrzania się jego ścianki. Pomija się zatem ewentualny wzrost przemieszczenia radialnego ścianki z powodu przyrostu parcia ośrodka sypkiego w wyniku jego nagrzania.

Przyjęto, że w wyniku nagrzania próbki i naczynia nastąpi wzrost objętości próbki z objętości początkowej V_o do objętości końcowej $V_{\Delta t + \Delta r}$:

$$V_{\Delta t + \Delta r} = \pi (r_o + \Delta r)^2 (l_o + \alpha_{tm} \Delta t l_o) \quad (2)$$

gdzie: l_o jest początkową wysokością próbki ośrodka sypkiego, a α_{tm} liniowym współczynnikiem rozszerzalności cieplnej ośrodka sypkiego (wielkością poszukiwaną).

We wzorze (2) wyrażenie

$$l_o + \alpha_{tm} \Delta t l_o = l_o (1 + \alpha_{tm} \Delta t) \quad (3)$$

oznacza końcową wysokość rdzenia ośrodka sypkiego po jego rozgrzaniu (rys. 1).

Przyrost objętości cylindrycznego rdzenia ośrodka sypkiego (z uwzględnieniem przyrostu jego promienia i przyrostu wysokości) wynosi:

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_{\Delta t + \Delta r} - V_o = \pi l_o (r_o + \Delta r)^2 [1 + \alpha_{tm} \Delta t] - \pi l_o r_o^2 = \\ &= \pi l_o [(r_o + \Delta r)^2 + \alpha_{tm} \Delta t (r_o + \Delta r)^2 - r_o^2] \end{aligned} \quad (4)$$

Przyrost objętości ΔV (4) przeliczono na zmianę długości efektywnej rdzenia Δl_{eff} , którą można pomierzyć doświadczalnie (rys. 1) na podstawie zmiany położenia (przemieszczenia) górnej powierzchni ośrodka. Po przekształceniach otrzymano:

$$\begin{aligned} \Delta l_{eff} &= \frac{\Delta V}{\Delta F} = \frac{\pi l_o [(r_o + \Delta r)^2 + \alpha_{tm} \Delta t (r_o + \Delta r)^2 - r_o^2]}{\pi (r_o + \Delta r)^2} = \\ &= l_o \left[1 + \alpha_{tm} \Delta t - \frac{r_o^2}{(r_o + \Delta r)^2} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Podstawiając wyrażenie (1) do wzoru (5) otrzymano zależność na liniowy współczynnik rozszerzalności termicznej ziarna α_{tm} :

$$\alpha_{tm} = \frac{\Delta l_{eff}}{l_o} \left[1 - \frac{1}{(1 + \alpha_{tc} \Delta t)^2} \right] \left[\frac{1}{K} \right] \quad (6)$$

Przyrost wysokości rdzenia materiału sypkiego Δl_{eff} jest wielkością mierzoną.

Wartość wyrażenia w liczniku wzoru (6) wymaga, aby dodatni mierzalny przyrost Δl_{eff} spełniał warunek:

$$\frac{\Delta l_{eff}}{l_o} > 1 - \frac{1}{(1 + \alpha_{tc} \Delta t)^2} \quad (7)$$

Dla założonego w badaniach przyrostu temperatury $\Delta t = 60$ [deg] i przy stałej ściance cylindra ($\alpha_{tc} = 0,000012$ [1/K]) otrzymano następujące zależności:

$$\frac{\Delta l_{eff}}{l_o} > 1 - \frac{1}{(1 + 0,000012 \cdot 60)^2} = 0,00144 \quad (8)$$

lub

$$\Delta l_{eff} > 0,00144 l_o \quad (9)$$

Proste symulacje obliczeniowe wskazują, że warunek (9) będzie spełniony tylko w przypadku, gdy współczynnik rozszerzalności termicznej ziarna okaże się znacznie większy od współczynnika rozszerzalności stałowej ścianki cylindra. Ponieważ brak jest uzasadnienia tego założenia „a priori” przyjęto, że w eksperymencie zostanie zapewniony stały promień cylindra. Można

to osiągnąć w przypadku, gdy w czasie pomiarów ścianka naczynia nie ulegnie ogrzaniu. Wymaga to odpowiedniego chłodzenia ścianki w trakcie eksperymentu, aby utrzymywać ją w stałej temperaturze, równej wyjściowej temperaturze pomiaru. W takim przypadku obowiązywać będzie prosta zależność na wydłużenie rdzenia ośrodka sypkiego:

$$\Delta l_{eff} = l_o \alpha_m \Delta t \quad (10)$$

skąd można wyznaczyć liniowy współczynnik rozszerzalności termicznej ziarna α_m

$$\alpha_m = \frac{\Delta l_{eff}}{l_o \Delta t} \left[\frac{1}{K} \right] \quad (11)$$

3. Stanowisko pomiarowe i procedura badawcza

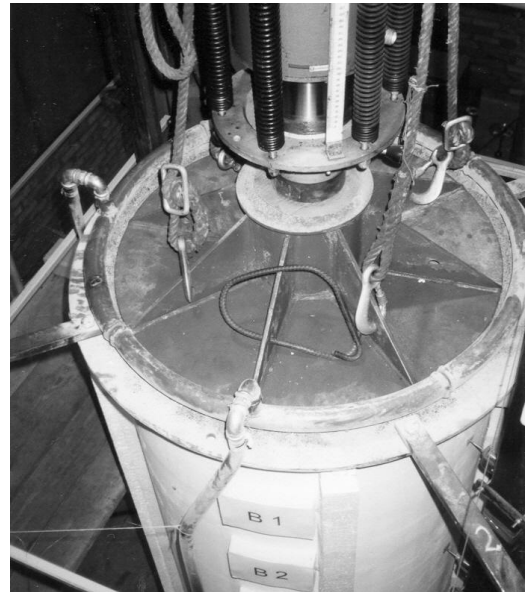
Do przeprowadzenia badań zgodnych z podanymi wyżej założeniami planuje się wykorzystanie dużego modelu cylindrycznej komory silosowej z siatkoconu, znajdującego się w laboratorium badawczym Katedry Konstrukcji Budowlanych Politechniki Białostockiej. Konstrukcję modelu (rys. 2) opisano szerzej między innymi w pracach Prusiel i Łapko (2007) oraz Prusiel (2011). Wyposażenie komory modelowej spełnia założenie o konieczności utrzymania stałej temperatury ścianki modelu, z uwagi na wmontowany w ściankę modelu wewnętrzny system hydrauliczny złożony z układu rurek stalowych umożliwiających chłodzenie ścianki. Na rysunku 2 widoczny jest dolny fragment modelu z instalacją wodną złożoną z rurek stalowych i przewodów doprowadzających wodę do wnętrza ścianki.



Rys. 2. Widok modelu silosu z instalacją hydrauliczną umożliwiającą chłodzenie ścianki silosu

Konstrukcja modelu umożliwia ponadto zagęszczenie ośrodka sypkiego przy użyciu stalowej płyty dociskającej górną powierzchnię ośrodka za pomocą siłownika hydraulicznego. Na rysunku 3 pokazano widok

uźebrowanej płyty dociskowej po ułożeniu w modelu komory wraz z siłownikiem hydraulicznym.

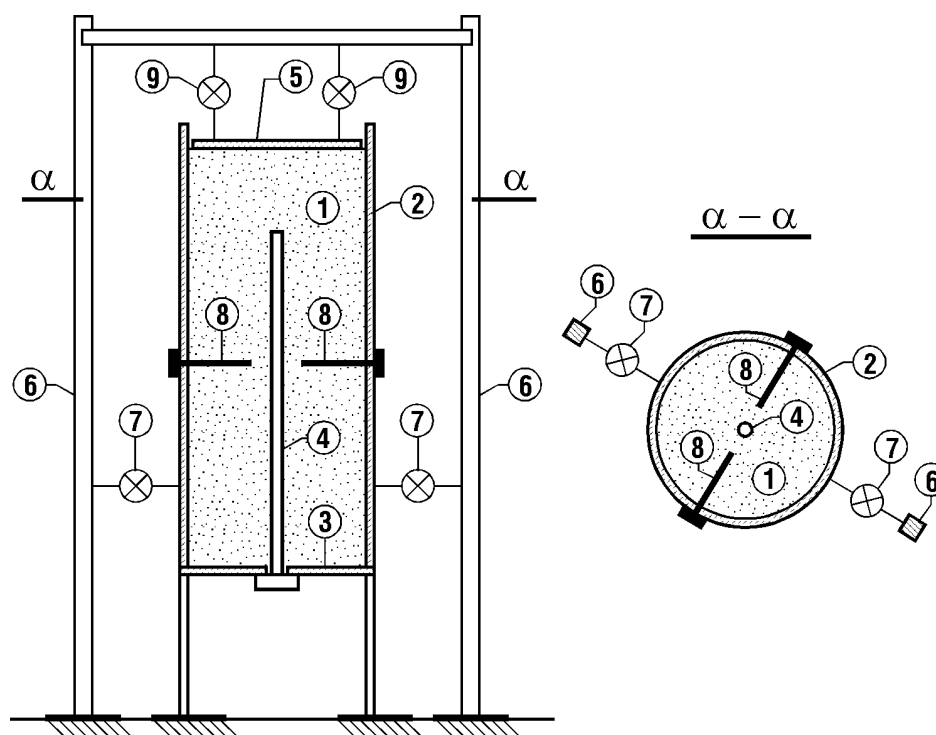


Rys. 3. Urządzenie dociskowe górnej powierzchni ziarna w modelu

Schemat modelu komory silosowej według zastrzeżenia patentowego w wariantcie niezbędnym do przeprowadzenia badań pokazano na rysunku 4. W dnie modelu zamocowany jest rdzeń nagrzewający ośrodek sypki, natomiast w ścianie modelu zamocowane są poziomo dwie sondy do pomiaru temperatury o długości 350 mm.

Procedura pomiarowa przy użyciu opisanego wyżej modelu komory silosowej przewiduje następujące etapy prowadzenia eksperymentu (rys. 4):

1. napełnienie komory silosowej ośrodkiem sypkim o temperaturze otoczenia i zamocowanie sond temperaturowych (8);
2. wypoziomowanie powierzchni górnej ośrodka, ułożenie kolistej płyty dociskowej (5) i trzykrotne dociążenie i odciążenie płyty siłownikiem hydraulicznym;
3. zwolnienie ostateczne docisku, zamocowanie czujników pomiaru przemieszczenia górnej powierzchni ośrodka (9) oraz czujników pomiaru przemieszczenia radialnego ścianki (7);
4. uruchomienie nagrzewania ośrodka z jednoczesnym utrzymywaniem stałej temperatury ścianki modelu;
5. skomputeryzowany, równoczesny i ciągły pomiar następujących wielkości fizycznych:
 - a) przemieszczenia radialnego ścianki,
 - b) przemieszczenia górnej powierzchni ośrodka sypkiego,
 - c) temperatury ośrodka sypkiego (w kilku punktach na średnicy modelu) i wewnętrznej powierzchni ścianki,
 - d) temperatury zewnętrznej powierzchni ścianki,
 - e) odkształcenia obwodowego ścianki modelu.



Rys. 4. Schemat konstrukcji stanowiska badawczego do pomiarów współczynnika rozszerzalności termicznej ośrodka sypkiego według Zastrzeżenia Patentowego (Łapko i Prusiel, 2011): 1 – ośrodek sypki, 2 – siatkobetonowa ściana komory, 3 – dno komory oparte na standzie, 4 – centralnie umieszczony nagrzewający rdzeń stalowy, 5 – płyta stalowa zagęszczająca górną powierzchnię ośrodka sypkiego, 6 – niezależny stand mocujący czujniki przemieszczeń, 7 – czujniki przemieszczeń radialnych ścianki, 8 – sondy temperaturowe w masie sypkiej, 9 – czujniki przemieszczenia górnej powierzchni ośrodka sypkiego

Nagrzewanie ośrodka sypkiego należy prowadzić tak długo, aż temperatura masy sypkiej ulegnie wyrównaniu na długości promienia komory modelowej a przyrost temperatury ośrodka ziarnistego w pobliżu centralnej osi komory osiągnie założoną wartość Δt .

Na podstawie analizy obliczeniowej podanej wyżej liniowy współczynnik odkształcalności termicznej ziarna obliczany będzie z przekształconego wyrażenia (5) na podstawie wzoru:

$$\alpha_{tm} = \frac{1}{\Delta t} \left\{ \frac{\Delta l_{eff}}{l_o} - \left[1 - \frac{r_o^2}{(r_o + \Delta r)^2} \right] \right\} \quad (12)$$

który po podstawieniu wymiarów opisanego modelu pomiarowego: $l_o = 2500$ mm i $r_o = 408$ mm, przybierze postać

$$\alpha_{tm} = \frac{1}{\Delta t} \left\{ \frac{\Delta l_{eff}}{2500} - \left[1 - \frac{408^2}{(408 + \Delta r)^2} \right] \right\} \quad (13)$$

gdzie Δr jest pomierzonym przemieszczeniem radialnym ścianki.

W przypadku, gdy pomierzone przemieszczenie radialne ścianki Δr (zgodnie z założeniem) okaże się zerowe, to wynik otrzymany ze wzoru (12) będzie tożsamościowo równy wynikowi uzyskanemu ze wzoru (11).

4. Podsumowanie

W literaturze przedmiotu brak jest szczegółowych informacji dotyczących wartości współczynnika rozszerzalności termicznej ośrodków ziarnistych składowanych w silosach. Ocenia się, że w przypadku ośrodków agrofizycznych współczynnik ten może osiągać wartość znacznie przekraczającą odpowiednie wartości współczynnika materiału ściany silosu. Parametr ten może mieć więc istotny wpływ na konstrukcję ściany silosu, w przypadku gdy w masie ziarna dojdzie do procesów biologicznych powodujących zjawisko samonagrzewu. Zaproponowana metoda oparta na pomiarach wielkości fizycznych w modelowej komorze wypełnionej ośrodkiem ziarnistym umożliwia wyznaczenie liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej ziarna w warunkach zagęszczenia masy ośrodka sypkiego.

Literatura

- Fortier J. L., Simard M. A., Picker P., Jolicoeur C. (1979). Direct continuous measurements of thermal expansion coefficients of liquids and solids using flow microcalorimetry. *Review of Scientific Instruments*, Vol. 50, No. 11, 1474-1480.
- Jakovlev L. T., Karev W. I., Skorikov B. A. (1982). Issledowanija vozdejstvija temperatury na stienki zelezobetonnych zernovych silosov. W: *Issledowanija napriazonnogo sostojanija zelezobetonnych silosnych sooruzenij*, Saratov, 3-10.

- Kazakov E. D., Kretovič V. L. (1989). Biohimja zerna i produktov ego pererabotki. *Agropromizdat*.
- Łapko A., Prusiel J. A. (2011). Stanowisko do pomiaru współczynnika rozszerzalności termicznej ośrodków sypkich. Zgłoszenie nr P.393588 (2011), *Urząd Patentowy RP*.
- Prusiel J. A., Łapko A. (2007). Investigation of heat and moisture effects in silos containing agricultural bulk solids. *Particle and Particle Systems Characterization*, Vol. 24, No. 4/5, 284-290.
- Prusiel J. A. (2011). Doświadczalne wyznaczanie parametrów opisujących model interakcji ściany silosu i ośrodka sypkiego. *Inżynieria i Budownictwo*, 6/2011, 317-320.

**METHOD OF THERMAL DEFORMABILITY
EVALUATION OF ORGANIC GRANULAR MEDIA
STORED IN SILOS**

Abstract: The paper presents a conception of measuring stand and testing procedure for evaluation of thermal expansion coefficient of organic granular media stored in silos under real consolidation stress state in grain. This problem is particularly important in organics solids where the biological process of self heating could occur. Theoretical assumptions of proposed experimental method are given. The measurements should be conducted in model silo chamber equipped with surcharge rigid steel plate consolidating the grains and with centrally located core that enables heating the grains. The described method was registered as the Patent Claim.

Artykuł opracowano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji pracy statutowej S/WBiŚ/2/2012.