

Metody testowania właściwości reologicznych żywności

Jerzy A. Balejko

Instrumentalne pomiary tekstury powinny być przeprowadzane w warunkach symulujących te, jakie występują podczas oceny sensorycznej. Ponieważ większość pożywienia ma naturę lepkosprężystą, wskaźnik deformacji i zastosowana siła stają się parametrami krytycznymi. Obydwie zmienne muszą być brane pod uwagę, ponieważ zmieniają się one w trakcie oceny sensorycznej, w zależności od charakterystyki żywności.

W metodach naśladowczych stosuje się takie sposoby deformacji próbek, które powinny imitować odkształcenia, jakim żywność podlega w warunkach rzeczywistych. Parametry reologiczne, wyznaczane za pomocą metod naśladowczych imitujących proces żucia w jamie ustnej, w dużym stopniu zależą od zastosowanego stopnia deformacji próbki.

Testy dynamiczne charakteryzują się dużą szybkością, dzięki której w trakcie ich przeprowadzania występują minimalne zmiany właściwości chemicznych i fizycznych. Dodatkowo mechaniczne właściwości mogą być określone w krótkim czasie na różnych poziomach temperatury i częstotliwości.

W reologii żywności metody dynamiczne dzieli się na:

1. Metodę rezonansową, w której próbka o znanej geometrii jest wprowadzana w rezonans lub oscyluje swobodnie.
2. Impulsową propagację fal, w której mierzony jest czas przejścia przez próbkę fali o wysokiej częstotliwości.
3. Metodę pomiaru impedancji elektrycznej i zamiany jej na impedancję mechaniczną, z której liczone są dynamiczne właściwości badanego materiału.
4. Metodę bezpośredniego pomiaru sinusoidalnie zmiennego naprężenia i odkształcenia.

Parametry mechaniczne, które decydują o zdolności materiału do przenoszenia wibracji, to głównie jego gęstość, sprężystość i tarcie wewnętrzne. O wyborze metody pomiarowej decydują wymiar krytyczny próbki i ograniczenia związane z użytecznym zakresem dostępnych częstotliwości. Wymiar krytyczny to wymiar w kierunku działania siły dla jednoosiowego ściskania. Stosunek wymiaru krytycznego L do długości fali λ , propagowanej w częstotliwości pomiaru f , może stanowić kryterium wyboru najbardziej odpowiedniej metody. Metody rezonansowe były pierwotnie stosowane do ustalania częstotliwości rezonowania

i w związku z tym do określania modułu Younga, modułu sprężystości poprzecznej i współczynnika straty zadanej częstotliwości.

Teoria rezonansu była używana dla jednoosiowego modelu składającego się ze sprężyny o współczynniku sprężystości k , z tłumika drgań (hydraulicznego tłumika tłokowego), ze współczynnikiem tłumienia lepkości c , oraz z masy m (rys. 1).

Ogólne równanie dla zaprezentowanego systemu zachowań w trakcie działania sinusoidalnej siły $P_0 \sin \omega t$, z amplitudą P_0 i częstotliwością kołową ω przedstawia zależność:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P_0 \sin \omega t$$

Jeśli stała tłumienia jest mało znacząca i jeśli nie ma zewnętrznej siły wzbudzającej, to:

$$m\ddot{x} + kx = 0$$

oraz nie stłumiona naturalna częstotliwość wibracji:

$$f_n = \frac{\pi}{2} \left(\frac{k}{m} \right)^{0,5}$$

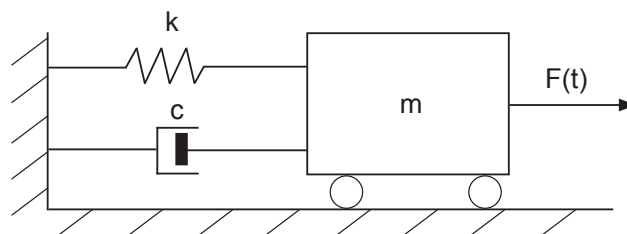
Powyższą teorię wykorzystano do określenia modułu sprężystości próbek żywności w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 0,006 x 0,002 x 0,050 m.

Podstawowe oprzyrządowanie dla testów rezonansowych składa się z generatora częstotliwości i wzmacniacza siły, napędzającego wzbudnicę drgań. Wzmocniony sygnał z detektora jest mierzony przez woltomierz. Oscyloskop i rejestrator są dodatkowymi urządzeniami do rejestrowania krzywych odpowiedzi.

Metodę rezonansu stosowano do określania lepkosprężystych właściwości całych owoców i warzyw w zakresie częstotliwości 0-800 Hz.

Moduł sprężystości próbki, która została wprowadzona rezonans za pomocą wibratora (elektromagnetycznego lub innego) można obliczyć z zależności:

$$E = K_2 f^2$$



Rys. 1. Model rezonansu

gdzie: E - moduł sprężystości, f - częstotliwość rezonansowa, K - stała determinowana przez kształt i gęstość materiału.

Zastosowanie powyższego równania podawanego w różnych postaciach, ogranicza się do badania wibracji giętkiej belki wspornikowej wg równania rezonansowego:

$$E' = \frac{38,3 \rho L^4 f_r^2}{d^2}$$

gdzie: E' - moduł akumulacji (składowa zespolonego modułu E^*) [$N \cdot m^{-4}$], ρ - gęstość [$g \cdot m^{-3}$], L - długość swobodna próbki w [m^2], d - grubość próbki [m^2], f_r - częstotliwość rezonansowa drgań [$1 \cdot s^{-1}$].

Jeśli znany jest współczynnik strat $\tan \delta$, to moduł strat E'' można obliczyć z równania:

$$E'' = |E^*| \cos \delta$$

Ten parametr można obliczyć z równań połowy amplitudy rezonansu, co graficznie interpretuje wykres krzywej rezonansu (rys. 3).

Gdy używa się techniki drgań swobodnych, stosunek modułu strat do modułu akumulacji (równanie poniżej) opisuje

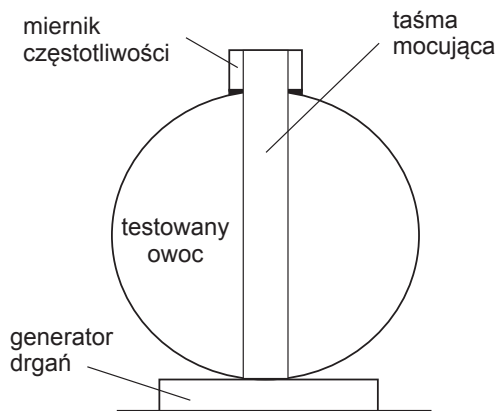
logarytmiczne opadanie krzywej odpowiedzi tłumionej, jak to pokazano na rys. 4.

$$\frac{E''}{E'} = \frac{1}{\pi} \ln \frac{A_1}{A_2}$$

W metodach ultradźwiękowych fale sprężyste generowane są w ciele stałym, które odpowiednio do jego wymiarów charakterystycznych i własnej bezwładności pozostaje nieruchome, to fale będą się rozprzestrzeniać, powodując zarówno ściskanie, jak i ściśnięcie ciała stałego. Prędkość przemieszczania się fal zależna jest od modułu sprężystości oraz gęstości ciała stałego. Fale ścisające rozchodzą się z największą prędkością i docierają do przeciwległego końca ciała stałego wcześniej niż fale ścinające. Czas przejścia fali można dokładnie określić za pomocą przetwornika kwarcowego. Jeśli droga, jaką przebywa fala w ciele stałym jest znana, to można ustalić prędkość fali, a znając ją można obliczyć moduł z równania:

$$E = \rho \cdot V^2$$

Prędkość fali V zależy nie tylko od gęstości ośrodka czy



Rys. 2. Test dynamiczny przeprowadzany metodą rezonansu

Przedstawiciel w Polsce Firmy IKA WERKE GmbH

Działalność firmy obejmuje doradztwo techniczne, dystrybucję i handel sprzętem laboratoryjnym, pomiarowo-analitycznym i produkcyjnym:



▪ sprzęt laboratoryjny

- mieszadła magnetyczne, mieszadła mechaniczne, homogenizatory, wytrząsarki, młynki, łaźnie wodne
- płyty grzewcze, pompy próżniowe i perystaltyczne, wyparki, ekstraktory substancji stałych, reaktory laboratoryjne

▪ sprzęt pomiarowo-analityczny

- zagniatarki, elektrolizery, termograwimetry, kalometry, analizatory laboratoryjne C, S, N, O, H, CO2

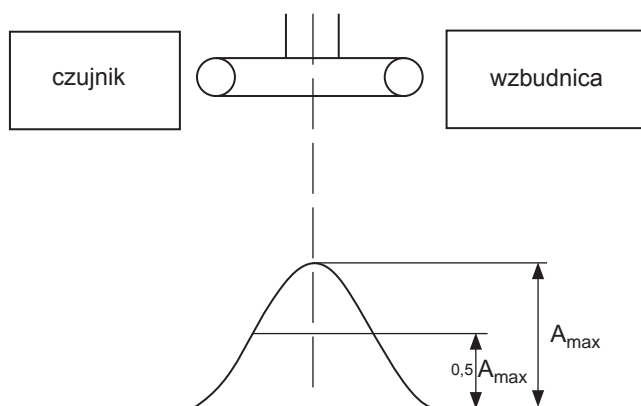
▪ sprzęt produkcyjny

- pojemnościowy - homogenizatory, turbotrony, rototrony
- przepływowy - homogenizatory, dispax reaktory, młyny koloidalne
- emulgatory - mieszalniki (o poj. of 10 - 4000 l) - dla substancji o różnej lepkości

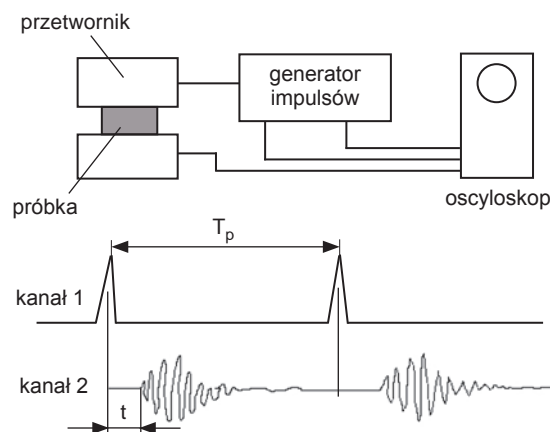


IKA POL

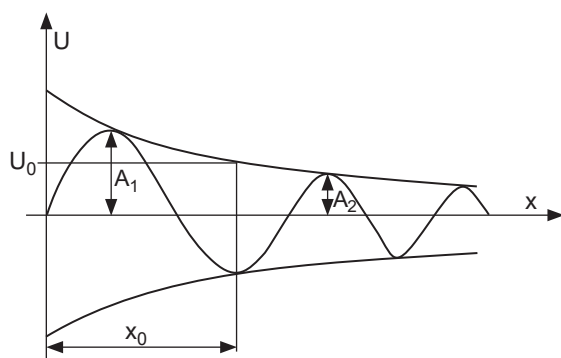
02-793 Warszawa, ul. Przy Bażantarni 4/6, Biuro
Obsługi Klienta: 02-886 Warszawa; ul. Rybałtów 14
tel.: 22/649 24 05; fax: 22/ 859 14 39,
email: info@ikapol.pl, www.ikapol.pl, www.ika.com



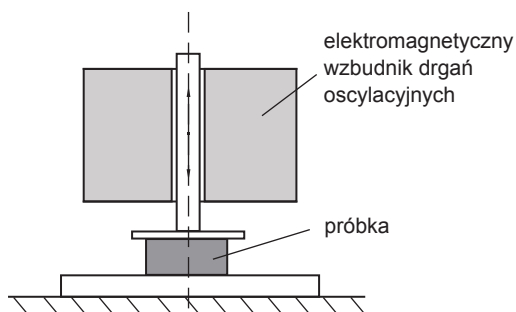
Rys. 3. Metoda połowy amplitudy rezonansu



Rys. 5. Technika impulsów ultradźwiękowych; t - czas przejścia, T_p - okres powtarzania impulsów



Rys. 4. Metoda logarytmicznego zmniejszania amplitudy drgań podczas gasnących drgań swobodnych. A_1 i A_2 - amplituda odkształcenia, λ - długość fali



Rys. 6. Schemat aparatu przetwornikowego do pomiarów dynamicznej lepkości w zakresie wysokich częstotliwości

modułu sprężystości, ale również od kierunku jej rozchodzenia się. Dla fal podłużnych lub ściskających:

$$V = \left[\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Dla fal poprzecznych lub ścinających:

$$V = \left[\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \mu)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Tłumienie materiału można wyliczyć przez pomiar amplitudy dwóch następujących po sobie fal. Jest ono odwrotnością współczynnika strat $\tan \delta$ (rys. 4). Pomiar prędkości można przeprowadzić, korzystając z techniki impulsów ultradźwiękowych (rys. 5).

W stosowaniu tej techniki do badania materiałów biologicznych problemem są warunki i rodzaj powierzchni kontaktowej, co jest powodem powstawania sprzężeń akustycznych wynikających z obecności warstwy powietrza pomiędzy przetwornikiem a próbką. Metoda pomiaru impedancji elektrycznej i mechanicznej polega na pomiarze parametrów elektrycznych, z których wyliczane są parametry mechaniczne. Płytkę kontaktowa jest przemieszczana osiowo przez cewkę zawieszoną w szczelinie powietrznej magnesu stałego, zapewniając sztywny i lekki sposób przemieszczania,

pozbawiony tarcia, podczas poruszania się cewki w polu magnetycznym. Podłączenie zmiennego prądu do cewki sprawia, że pręt - podlegając sinusoidalnie zmiennej sile - powoduje również sinusoidalnie zmienne odkształcenie lepko-sprężystego ciała stałego. Zależność pomiędzy impedancją elektryczną Z_{mot} odpowiednio do ruchu i impedancji mechanicznej Z_{mech} ma postać:

$$Z_{mech} \cdot Z_{mot} = A$$

gdzie: Z_{mech} - siła/prędkość, Z_{mot} - wsteczna SEM (siła elektromotoryczna)/prąd, A - siła elektromechaniczna. Impedancja mechaniczna jest

powiązana z modułami akumulacji i strat poprzez następujące równanie, uproszczone dla łożyska gazowego do postaci:

$$Z_{mech} = \left(\frac{a}{\omega} \right) E'' + i \left(\omega \cdot M - \frac{a}{\omega} E' \right)$$

gdzie: a - współczynnik kształtu próbki, ω - częstotliwość, E'' - moduł akumulacji, E' - moduł strat, M - całkowita masa efektywna. Aparat przetwornikowy, przedstawiony na rys. 6, używany jest do badań w zakresie częstotliwości od ok. 30 do 200 cykli na sekundę. Amplituda płytki odkształcającej próbkę jest mniejsza niż 0,0001 m.