

problemy agrofizyki

POLSKA AKADEMIA NAUK · ZAKŁAD AGROFIZYKI



**WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE
CIAŁ KAPILARNO-POROWATYCH
I METODY ICH POMIARU**

P O L S K A A K A D E M I A N A U
ZAKŁAD AGROFIZYKI W LUBLINIE

PROBLEMY AGROFIZYKI

22

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

PROBLEMY AGROFIZYKI

22

HELENA LISOWA, JANUSZ HAMAN, TADEUSZ LIS

WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE CIAŁ KAPILARNO-POROWATYCH I METODY ICH POMIARU

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

1976

Komitet Redakcyjny
BOHDAN DOBRZAŃSKI (przewodniczący)
JAN GLIŃSKI, BOGUSŁAW SZOT

Okladkę projektował ZYGMUNT ZIEMKA
Redaktor techniczny RYSZARD DĘBICKI

Wykonano z oryginałów tekstowych
dostarczonych przez Zakład Agrofizyki

Wszelkie prawa zastrzeżone. Printed in Poland

Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo. Wrocław 1976.
Nakład: 390 egz. Objętość: ark. wyd. 3,30, ark. druk. 4,88. Papier
offset, kl. III, 70 g, 61 × 86. Wykonano w sierpniu 1976. Wrocławska
Drukarnia Naukowa. Zam. 2197/76-L-11 Cena zł 22. –

1. WPROWADZENIE

Podstawowym pojęciem fenomenologicznej teorii przewodzenia ciepła jest pole temperatury. Ma ona charakter skalarny, gdyż każdemu punktowi pola podporządkowana jest pewna wartość temperatury. Pole temperatury można opisać w formie funkcji $T = f(x, y, z, \tau)$, przy czym x, y, z oznaczają współrzędne, natomiast τ - czas. Jeżeli $\partial T / \partial \tau \neq 0$, pole temperatury ma charakter niestacjonarny. Pole temperatury jest polem płaskim, jeżeli temperatura zależy od dwóch współrzędnych, np. $T = f(x, y)$, lub polem liniowym, jeżeli w pewnym obszarze przestrzennym temperatura zależy od jednej zmiennej (28).

Powierzchnie dla których $T = f(x, y, z, \tau) = \text{const.}$ utworzone z punktów o jednakowej temperaturze są nazywane izotermicznymi. Równanie izotermy o temperaturze $T = T_0$ ma postać $T_0 = f(x, y, z, \tau)$. Każdemu punktowi izotermy można przypisać pewną prędkość chwilową ruchu ciepła w kierunku normalnym. Linie normalne do izoterm w środowisku izotropowym nazywamy adiabatami, czyli liniami przepływu ciepła (28, 40).

Mocą cieplną $\dot{Q}$ nazywamy ilość ciepła przechodzącego przez powierzchnię w ciągu jednostki czasu, co można napisać w postaci $\dot{Q} = dQ/d\tau$. Strumieniem cieplnym $\dot{q}$ w określonym punkcie pola temperatury nazywamy wektor, którego wartością bezwzględną jest granica ilorazu mocy strumienia cieplnego $\Delta \dot{Q}$, przenikającego

przez element ΔF_A powierzchni izotermicznej zawierającej punkt A, gdy średnica elementu ΔF_A dąży do zera, co można zapisać w formie wyrażenia o postaci

$$\dot{q}_A = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta \dot{Q}}{\Delta F_A} \quad (1)$$

Z każdym polem temperatury związane jest pole wektorowe strumienia cieplnego $\dot{q}$, którego linie wektorowe są adiabatami. Innym polem wektorowym, związanym z polem temperatury $T = f(x, y, z, \tau)$, jest pole gradientu temperatury $\text{grad } T(x, y, z, \tau)$. Maksymalna zmiana temperatury na jednostkę długości zachodzi w kierunku normalnym do powierzchni izotermicznej (39) i charakteryzuje ją gradient temperatury, przy czym

$$\text{grad } T = \nabla T = \delta_l \frac{\partial T}{\partial l} = \delta_x \frac{\partial T}{\partial x} + \delta_y \frac{\partial T}{\partial y} + \delta_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

gdzie δ_l - jednostkowy wektor w kierunku normalnym do wzrastającej temperatury;
 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ - ortogonalne, jednostkowe wektory,
 $\frac{\partial T}{\partial l}$ - pochodna temperatury do odległości l , mierzonej w kierunku normalnym do powierzchni izotermicznej.

Linie gradientu temperatury są liniami normalnymi względem rodziny powierzchni izotermicznych. Dla ciał izotropowych pokrywają się one z adiabatami (28). Stąd wynika, że pokrywają się one również z liniami wektorowymi pola strumienia cieplnego. Wektor $\text{grad } T$ jest zwrócony w kierunku wzrostu temperatury, tzn. jest przeciwny do wektora $\dot{q}$ (28), tj.

$$\dot{q} = -c \text{ grad } T \quad (3)$$

przy czym c jest pewną liczbą dodatnią (dla ciał izotropowych).

Znając grad T można napisać układ równań różniczkowych dla adiabat pola temperatury (28). Są to równania o postaci

$$\frac{d_x}{\partial T} = \frac{d_y}{\partial T} = \frac{d_z}{\partial T} \quad . \quad (4)$$

$$\frac{\partial x}{\partial x} \quad \frac{\partial y}{\partial y} \quad \frac{\partial z}{\partial z}$$

Według teorii Fouriera pole temperatur ciała zależy od charakteru wymiany ciepła z otaczającym środowiskiem. Przy założeniu, że ruch ciepła zachodzi bezpośrednio od nagrzanego ciała do otaczającej, chłodnej przestrzeni nieograniczonej, może on być opisany równaniem o postaci

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (5)$$

gdzie $\vec{q}$ - gęstość strumienia cieplnego, proporcjonalna do gradientu temperatury ∇T ,

λ - współczynnik przewodzenia ciepła, liczbowo równy gęstości strumienia ciepła, przy gradencie temperatury równym jedności.

Dla jednowymiarowego pola temperatur wielkość strumienia ciepła jest określona równaniem o postaci (36)

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad . \quad (6)$$

Przy stałym gradencie temperatury $dT/dx = \text{const}$ zależność zmian temperatury od współrzędnych ma charakter liniowy, przy czym

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \text{const} \quad . \quad (7)$$

Wyrażenie $\lambda / \Delta x = \lambda / (x_1 - x_2)$ [W/(m K)] jest oczywiście przewodnością cieplną danego ciała na określonym odcinku, a jego odwrotność - oporem cieplnym.

Fourier, Newton i Richman, rozpatrując przewodność ciał stałych w ośrodku gazowym, niezależnie jeden od drugiego, stwierdzili, że ilość wymiennego ciepła $\dot{q}$ jest wprost proporcjonalna do różnicy pomiędzy temperaturą powierzchni ciała T_w i temperaturą otaczającego środowiska T_f . Zjawisko to, zwane prawem Newtona, jest przedstawione analitycznie w formie równania o postaci

$$\dot{q} = \alpha (T_w - T_f) = \alpha \cdot \Delta T, \quad (8)$$

gdzie α - współczynnik przejmowania ciepła, liczbowo równy strumieniowi ciepła wymienianego przez ciało przy jednostkowej różnicy pomiędzy temperaturą powierzchni ciała T_w i temperaturą otaczającego płynu T_f , W/(m² K).

Wymiana ciepła z otoczeniem może zachodzić wskutek przewodzenia, konwekcji i promieniowania. Według Łykowa [39], przy małych różnicach temperatur pomiędzy powierzchnią ciała i otaczającym środowiskiem, prawo Stefana-Boltzmann'a (dotyczące promieniowania ciepła) może być aproksymowane równaniem Newtona (8). W ten sposób wszystkie formy przekazywania ciepła mogą mieć formę liniowych funkcji różnicy temperatur - i tak

$$\dot{q} = \alpha \Delta T = \alpha_p \Delta T + \alpha_k \Delta T + \alpha_r \Delta T, \quad (9)$$

gdzie α - sumaryczny współczynnik wymiany ciepła przez przewodzenie α_p , konwekcję α_k i promieniowanie α_r .

2. WPŁYW RÓŻNORODNYCH CZYNNIKÓW NA WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE CIAŁ

Określenie wartości podstawowych wielkości cieplnych materiałów jest głównym zadaniem współczesnej termodynamiki (39). Zróznicowanie właściwości fizycznych, mechanicznych i biologicznych badanych materiałów wymaga zastosowania różnorodnych

metod i metodyk wyznaczania termofizycznych charakterystyk. Stosunkowo najmniej problemów przysparza pomiar przewodności cieplnej litych ciał stałych, np. ciężkich minerałów oraz metali, który można w stosunkowo prosty sposób wykonać doświadczalnie w oparciu o fenomenologiczną teorię przewodzenia ciepła. Natomiast charakter przenoszenia ciepła w ciałach porowatych (strukturę porowatą posiada większość produktów rolniczych) jest złożony i nie może być rozwiązany wyłącznie przy pomocy metod empirycznych (33,39). W tym przypadku prawidłowe określenie roli konwekcji, dyfuzji i innych wielkości (przy eksperymentalnym pomiarze przewodności cieplnej) wymaga przeanalizowania fizycznej strony zachodzących zjawisk oraz określenia modeli procesów wpływających na przewodność cieplną.

Na wartość współczynnika przewodności cieplnej ciał organicznych o strukturze porowatej ma wpływ wiele czynników [11,18, 57-59]. Są to:

- 1) rodzaj, wartość i struktura porowatości,
- 2) zawartość wilgoci w materiale,
- 3) ciężar objętościowy,
- 4) temperatura,
- 5) skład chemiczny frakcji stałej,
- 6) struktura cząstkowa frakcji stałej,
- 7) rodzaje spojenia składników stałych,
- 8) rodzaj i ciśnienie gazu wypełniającego pory,
- 9) techniczna stała promieniowania powierzchni ograniczającej pory.

2.1. Wymiana ciepła w materiałach suchych

Jeżeli chodzi o wyznaczenie przewodności cieplnej produktów rolniczych, które są ciałami koloidalnymi o strukturze kapilarno-

porowatej, to zgodnie z ustaleniami Pabisa, Gadaja i Cybulskiej (15,48), oprócz czynników wymienionych w pkt. 1-9 należy również wziąć pod uwagę:

- 1) przewodność cieplną powietrza o dużej wilgotności (wypełnia ono przestrzenie międzyziarnowe),
- 2) ciepło właściwe.

Produkty rolnicze o dużej zawartości wilgoci mają skomplikowaną strukturę o układzie 3-fazowym: mieszanina gazów, ciecz, ciało stałe. Pomiar przewodności gazów jest obciążony błędem, gdyż trudno jest wyeliminować wpływ konwekcji i promieniowania (20). Według Mc Adamsa (za Hoblerem 20) dane liczbowe dotyczące tego problemu w literaturze dotychczasowej zawierają błędy dochodzące do 20%. Istnieje stosunkowo mało wskazówek o przewodzeniu ciepła w mieszaninach gazów, gdyż jest to problem złożony i nie może być rozpatrywany wyłącznie przy pomocy empirycznych metod (39). Porowatość warstwy zbóż i innych roślin uprawnych (uwzględniająca przestrzenie międzyziarnowe) waha się od 30 do 80% i niewątpliwie decyduje o jej właściwościach cieplnych. Wzrost porowatości powoduje zmniejszenie się przewodności cieplnej warstwy, która zbliża się do wartości tego współczynnika dla gazu wypełniającego pory. Jeżeli zmniejsza się porowatość warstwy, wówczas o właściwościach materiału w większym stopniu decyduje substancja stała.

Ciężar właściwy stałej substancji organicznej waha się w niewielkich granicach ($1450 - 1650 \text{ kg/m}^3$) i z tej przyczyny ciężar objętościowy materiału (razem z porami) jest dość dokładną miarą porowatości (objętości porów (6)). Według Cammerera zależność między porowatością Ψ (wyrażoną w % objętościowych), ciężarem objętościowym γ_{ob} i ciężarem właściwym γ określa wzór

$$\Psi = 100 \frac{\gamma - \gamma_{ob}}{\gamma} \quad . \quad (10)$$

Na ogół wzrost ciężaru objętościowego w zakresie 500-2000 kg/m³ powoduje odpowiedni wzrost wartości współczynnika przewodności cieplnej. Jednakże wielu badaczy stwierdziło, że jest wiele materiałów o niewielkim ciężarze objętościowym, wynoszącym 50-300 kg/m³, dla których przewodność cieplna maleje wraz ze wzrostem ciężaru objętościowego, ewentualnie przy określonym ciężarze objętościowym występuje minimum przewodności cieplnej - zarówno wzrost, jak i zmniejszanie się ciężaru objętościowego powoduje wzrost przewodności cieplnej (6,15,53). Do nich należy: włókno z trzciny cukrowej, włókno bazaltowe, wełna żuźlowa, maty z włókna szklanego itp. Zjawisko to Cammerer (9) tłumaczy możliwością istnienia porów o zróżnicowanych wymiarach w materiale o małym ciężarze objętościowym. Im większe są wymiary poszczególnych porów, tym intensywniejsza jest wymiana ciepła przez promieniowanie (9).

Według Cammerera (9) w materiałach organicznych wpływ właściwości substancji stałej na przewodność cieplną zaciera się przez wpływ powietrza zawartego w porach. Wartość współczynnika przewodności cieplnej powietrza w porach (po uwzględnieniu promieniowania) wynosi ok. 0,02-0,05 kcal/(m h °C); konwekcyjna wymiana ciepła w porach o małych wymiarach nie ma zazwyczaj znaczenia (9). Jeżeli jednak między ziarnami materiału sypkiego istnieją kanaliki powietrzne, to występuje również konwekcyjny ruch ciepła.

Jakkolwiek opracowano dotychczas wiele metod pozwalających na określenie przewodności cieplnej warstwy gazu otoczonej ściankami, to należy podkreślić, że wyniki uzyskane przy ich

pomocy odnośnie właściwości gazu, wypełniającego np. przestrzenie międzyziarnowe w warstwie zboża, mogą mieć jedynie charakter orientacyjny, zwłaszcza że ich dokładność nawet w przypadkach dużych szczelin powietrznych wewnątrz suchych materiałów izolacyjnych nie przekracza $\pm 8\%$ (9).

W materiałach o strukturze włóknistej i względnie uporządkowanym położeniu włókien, przewodność cieplna w pewnym stopniu zależy od kierunku strumienia cieplnego. Jak wynika z badań Fincka (15) przy prostopadłym kierunku ruchu ciepła przez warstwę włókna lnianego współczynnik przewodności cieplnej wynosił $0,0295 - 0,0325 \text{ kcal}/(\text{m h } ^\circ\text{C})$, natomiast przy ruchu równoległym był znacznie wyższy [$0,0661 - 0,103 \text{ kcal}/(\text{m h } ^\circ\text{C})$]. Wartości tego współczynnika dla drewna lekkiego wg Griffita (17) wynosiły natomiast przy prostopadłym kierunku ruchu ciepła $0,047 - 0,065 \text{ kcal}/(\text{m h } ^\circ\text{C})$, a przy równoległym $0,076 - 0,104 \text{ kcal}/(\text{m } ^\circ\text{C h})$.

Przewodność cieplna materiałów wzrasta wraz z powiększaniem się temperatury. Dotyczy to zarówno substancji stałej, jak i powietrza zawartego w porach. Jednakże w zakresie $0 - 50^\circ\text{C}$ wpływ temperatury nie jest stały w stosunku do działania innych czynników, a zwłaszcza wilgoci, i dlatego może być pominięty (9). Przy bardzo niskich oraz wysokich temperaturach należy jednak uwzględnić zależność przewodności od tego parametru. W przypadku organicznych materiałów izolacyjnych (płyty włókniste, korkowe, z wełny drzewnej) wzrost temperatury o 10°C powoduje przyrost współczynnika przewodności cieplnej o $0,001 - 0,011 \text{ kcal}/(\text{m h K})$ (9). Według Kaufmanna (24) w materiałach o dostatecznie dużej gęstości istnieje także jedynie nieznaczna zależność przewodzenia ciepła od temperatury. Badania przeprowadzone nad wpły-

wem temperatury na przewodność cieplną materiałów o wyjątkowo małej gęstości (włókno bazaltowe) wykazały, że przy zmianie temperatury w zakresie $0-50^{\circ}\text{C}$ przyrost współczynnika przewodzenia ciepła wynosił ok. $0,002 \text{ W/(m K)}$, natomiast w zakresie $50-300^{\circ}\text{C}$ - ok. $0,004 \text{ W/(mK)}$ (15).

Wpływ składu chemicznego substancji stałej na wartość współczynnika przewodności cieplnej materiału jest tym mniejszy, im większa jest porowatość (9). Przy jednakowej porowatości nie stwierdzono istotnych różnic między materiałem pochodzenia organicznego i nieorganicznego (9). Według Euckena (za Cammererem (9)) w materiałach o dużym udziale składników krystalicznych, wraz ze zwiększaniem się temperatury (szczególnie przy niezbyt wysokich jej wartościach) zmniejsza się przewodność cieplna, natomiast w ciałach o dużym udziale składników bezpostaciowych z podwyższaniem się temperatury wzrasta przewodność cieplna. Z wyników badań tego autora można wywnioskować, że o przewodności cieplnej materiału decydują jego właściwości fizyczne i krystalograficzne, zaś skład chemiczny ma uboczne znaczenie.

Wpływ stałej promieniowania wewnętrznej powierzchni porów na intensywność ruchu ciepła okazał się tym większy, im większa jest porowatość materiałów i mniejsza masa objętościowa (3,13). Zmiana stałej promieniowania (np. poprzez umieszczenie badanych próbek pomiędzy dwiema aluminiowymi foliami) powodowała zmniejszenie się wartości współczynnika przewodności cieplnej nawet do 20% (3). Wpływ stałej promieniowania na przewodność cieplną jest tym bardziej skuteczny, im jest wyższa temperatura (8).

Przewodność cieplna materiałów maleje wraz ze zmniejszeniem ciśnienia gazu wypełniającego pory, gdyż wydłuża się swobodna droga cząsteczek. Według Smoluchowskiego (za Cammererem (9))

współczynnik przewodności cieplnej luźno usypanej mąki ryżowej wynosił:

przy ciśnieniu	1 Tr - 0,002 kcal/(m h K),
przy ciśnieniu	10 Tr - 0,010 kcal/(m h K),
przy ciśnieniu	100 Tr - 0,026 kcal/(m h K),
przy ciśnieniu	1000 Tr - 0,041 kcal/(m h K).

2.2. Przewodność cieplna materiałów wilgotnych

Wpływ wilgotności na przewodność cieplną materiałów tłumaczono pierwotnie zastąpieniem powietrza, wypełniającego pory wodą o niemal 20-krotnie większej przewodności cieplnej, co wg Cammerera (9) okazało się niewystarczające. Krischer i Rohnlater (30) wykazali decydujący wpływ dyfuzji wilgoci w porach na wzrost wymiany ciepła, przy czym oprócz dyfuzji, w porach wypełnionych gazem, występują jeszcze następujące formy ruchu ciepła, a mianowicie:

- wymiana ciepła między ściankami ograniczającymi pory przez promieniowanie,
- konwekcja swobodna wewnątrz porów,
- przewodzenie (molekularne) gazu,
- wyparcie pewnej ilości powietrza w porach przez wodę mającą lepszą przewodność cieplną (zachodzi oczywiście również proces odwrotny),
- tworzenie mostków cieplnych przez wodę w miejscu styku ziarn materiału.

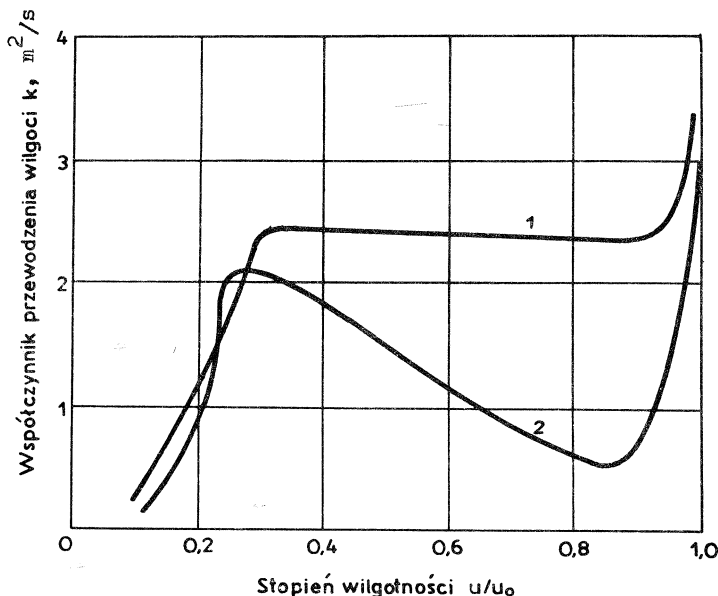
Właściwości cieplne wilgotnych ciał kapilarno-porowatych zależą przede wszystkim od ich higroskopijnej wilgotności równo-

wagowej, nasiąkliwości kapilarnej oraz intensywności procesu dyfuzji (9).

Właściwości higroskopijne materiału określają izotermy sorpcji, ewentualnie desorpcji, uzyskane po ustaleniu się stanu równowagi pomiędzy ciśnieniem pary wodnej w materiale oraz w otaczającym środowisku. Jednakże wilgotność ciał może mieć wyższą wartość od wilgotności równowagowej, odpowiadającej określonym parametrom otoczenia. Przyczyną tego może być zjawisko nasiąkliwości kapilarnej lub skraplanie pary wodnej na powierzchni, ewentualnie we wnętrzu ciała (9).

Nasiąkliwość kapilarna ma duże znaczenie w procesach pochłaniania, przewodzenia i oddawania wilgoci przez materiały (9). Wpływa ona na prędkość przemieszczania wilgoci wewnątrz ciał, a więc na takie procesy, jak nawilżanie lub suszenie. W celu liczbowego określenia tego zjawiska Krischer wprowadził pojęcie współczynnika przewodności wilgoci k (32), którego wartość zależy od rozmieszczenia kapilarów w materiale, napięcia powierzchniowego i lepkości cieczy oraz chwilowej zawartości wody. Na rys. 1 pokazano zależność współczynnika przewodzenia wilgoci k od wielkości u/u_0 , tj. stosunku aktualnej zawartości wody kg/kg s.m. do zawartości wody w stanie początkowym (dla kłębów ziemniaczanych oraz drewna).

Wartość współczynnika przewodzenia wilgoci k zmierza do zera przy zmniejszającej się wilgotności materiału. Ciała, w których podczas procesu suszenia występuje jedynie ruch cieczy, a nie pary, należą do trudno schnących z powodu zmniejszania się wartości tego współczynnika w miarę postępu procesu suszenia (29). Przy bardzo dużych zawartościach wilgoci w materiale wartość współczynnika k dąży do nieskończoności.



Rys. 1. Współczynnik przewodzenia wilgoci k w funkcji stopnia wilgotności u/u_0 ; 1 - dla ziemiaków, 2 - dla drewna (wg Kneulego 29)

Natężenie kapilarnego ruchu cieczy Krischer (32) wyraził w formie równania o postaci

$$\dot{m}_w = - A k \rho_s \frac{du}{dl}, \quad (11)$$

gdzie $\dot{m}_w$ - natężenie przepływu wilgoci, kg/s ,

A - pole przekroju materiału, m^2 ,

k - współczynnik przewodzenia wilgoci, wywołany działaniem sił kapilarnych, osmotycznych oraz Van Der Waalss'a, m^2/s ,

du/dl - gradient zawartości wody, $1/\text{m}$,

ρ_s - gęstość suchego materiału, kg/m^3 .

Ponieważ współczynnik przewodzenia wilgoci k nie ma dla wielu materiałów stałej wartości w żadnym zakresie wilgotności, przydatność rachunkowej metody jego określania jest ograniczona (9). W wielu przypadkach są natomiast pożyteczne proste badania nasiąkliwości materiałów. Badaniu podlega przebieg nasiąkania w czasie, odniesiony do jednostki poprzecznego przekroju oraz wysokości podsysania wody. Wyniki badań nanosi się na wykres w układzie podwójnie logarytmicznym (nasiąkliwość $[g/cm^2]$, czas $[godz]$) i wówczas wg Kettenackera (za Cammererem (9)) otrzymuje się prawie zawsze linie proste; równania tych linii można napisać w postaci

$$h = h' \tau^m, \quad (12a)$$

$$w = w' \tau^n, \quad (12b)$$

gdzie h - wysokość podsysania wody, cm,

h' - wysokość podsysania wody po upływie 1 godz., cm,

τ - czas od chwili rozpoczęcia badania, h,

m, n - wykładniki potęgowe, odpowiadające pochyleniu prostej na wykresie,

w - masa pochłoniętej wody, g/cm^2 ,

w' - masa pochłoniętej wody po upływie 1 godz. g/cm^2 .

Nasiąkliwość materiału charakteryzuje więc ilość pochłoniętej wody, względnie wysokość podsysania po upływie 1 godz. oraz prędkość przebiegu procesu w czasie.

Proces dyfuzji pary wodnej w porach wypełnionych gazem zachodzi wskutek zróżnicowania ciśnień pary i pod względem teoretycznym jest dostatecznie opanowany, co pozwala na jego matematyczne opracowanie. Jednakże posługiwanie się równaniami dyfuzji możliwe jest jedynie wówczas, gdy materiał jest na tyle suchy,

aby uzasadnione było pominięcie kapilarnego przewodzenia, które nie może być określone rachunkowo (9).

Dyfuzyjne przenoszenie masy może być rozpatrywane (9) jako:

- 1) ruch wilgoci w kierunku spadku ciśnienia cząstkowego pary wodnej (dyfuzja cząsteczkowa),
- 2) ruch wilgoci w kierunku spadku temperatury (dyfuzja termiczna lub termodyfuzja),
- 3) dyfuzja cząsteczkowa wraz ze skraplaniem pary wodnej przeniesionej do wnętrza materiału,
- 4) dyfuzja cząsteczkowa wraz ze skraplaniem lub odparowywaniem wilgoci na powierzchni ciała, w zależności od temperatury punktu rosy otaczającego powietrza,
- 5) dyfuzja ciśnieniowa, występująca w przypadku istnienia gradientu ciśnienia w mieszaninie płynów, powodująca ruch składnika lżejszego w kierunku obszaru niższego ciśnienia i odwrotnie - cięższego, w kierunku obszaru wyższego ciśnienia,
- 6) dyfuzja wymuszona, wywołana działaniem siły zewnętrznej różnej od siły ciężkości, działająca w różnym stopniu na cząsteczki różnych składników (np. dyfuzja jonów w polu elektrycznym).

W procesie ruchu wilgoci podstawowe znaczenie ma dyfuzja cząsteczkowa. Rola dyfuzji termicznej jest mniej znana niż cząsteczkowej.

Gęstość strumienia masy przenoszonej w procesie dyfuzji cząsteczkowej określa prawo Ficka:

$$J'_A = - D_{AB} \frac{dC_A}{dl}, \quad (13)$$

gdzie J'_A - strumień składnika A, $\text{kmol}/(\text{m}^2\text{h})$,

dC_A/dl - gradient stężenia, $\text{kmol}/(\text{m}^3\text{m})$,

D_{AB} - współczynnik dyfuzji dwuskładnikowej mieszaniny A i B, m^2/s , /np. dla składników powietrze woda, pod ciśnieniem 1 atm, w temp. 25°C , $D_{AB} = 0,260 \text{ cm}^2/\text{s}$ (2).

Według Cammerera (9) dyfuzja pary wodnej przez porowate materiały budowlane może być obliczona w oparciu o prawo Ficka, gdy ich temperatura nie przekracza 30°C , przy czym wzory obliczeniowe na przenikanie oraz przewodzenie wilgoci są w tym przypadku analogiczne do wzorów dotyczących ruchu ciepła. Podstawowe równanie przenikania wilgoci przez porowate ciało stałe przyjmuje więc postać

$$\dot{m}_w = \frac{\Delta P_w}{\frac{1}{\beta'_1} + \frac{1}{D'} + \frac{1}{\beta'_2}}, \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}), \quad (14)$$

gdzie ΔP_w - różnica ciśnień cząstkowych pary wodnej w powietrzu po obu stronach przegrody, kg/m^2 ,

β'_1, β'_2 - współczynniki przejmowania wilgoci między powietrzem i obu powierzchniami przegrody, $[\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}) \cdot \text{kg}/\text{m}^2]$,

D' - współczynnik przewodzenia wilgoci (dyfuzji) $\text{kg}/(\text{m h}) \cdot \text{kg}/\text{m}^2$ lub $1/\text{h}$.

Współczynniki przejmowania wilgoci β' oraz przewodzenia wilgoci D' nie są wielkościami stosowanymi w fizyce; zostały one wprowadzone w celu stworzenia formalnej analogii do wzorów na dyfuzję ciepła. Oblicza się je ze wzorów:

$$\beta' = \frac{\beta}{R_{pw} T} \quad (15)$$

$$D' = \frac{D}{\alpha R_{pw} T} \quad (16)$$

gdzie β - współczynnik przejmowania masy, m/h,

R_{pw} - stała gazowa pary wodnej, kgM/(kg K),

T - temperatura bezwzględna, K,

D - współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu, m²/h,

ψ - współczynnik oporu dyfuzyjnego materiału.

Zgodnie z badaniami przeprowadzonymi przez Schirmera (wg Kneulego (29) w zakresie temperatur 20 - 90°C współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu można wyrazić następującym wzorem

$$D = 0,083 \frac{9,81 \cdot 10^4}{p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81}, \text{ m}^2/\text{h}, \quad (17)$$

gdzie p - ciśnienie bezwzględne, N/m²,

T - temperatura bezwzględna, K.

Współczynnik oporu dyfuzyjnego μ określa wielokrotność oporu badanego ciała w stosunku do oporu dyfuzyjnego warstwy powietrza o tej samej grubości i temperaturze. Wielkość ta stanowi własność ciał suchych, niezależną od temperatury i ciśnienia. W przypadku ciał wilgotnych jego wartość zależy od wilgotności (5,9). Pomiar tej wielkości ma duże znaczenie praktyczne. W przypadku materiałów gruboporowatych pomiar współczynnika oporu dyfuzyjnego należy oprzeć na prawie dyfuzji Stefana (29).

Współczynnik oporu dyfuzyjnego zależy od porowatości materiałów Ψ . Zależność ta wg Görlinga (29) może być wyrażona w postaci wzorów

$$\mu \approx \frac{0,476}{\Psi^2} - \text{dla sypkiego, kulistego materiału o równym uziarnieniu}, \quad (18)$$

$$\mu \approx \frac{1}{\Psi^2} - \text{dla drobnodziarnistego materiału ze znacznym udziałem drobnego ziarna}. \quad (19)$$

Współczynnik oporu dyfuzyjnego dla suchej maki o porowatości $\Psi = 0,69$ wynosi 3,7.

Dyfuzja gazu przez porowate ciało stałe zachodzi wolniej niż w płynie swobodnym. Wynika to z przedłużenia i krętości drogi dyfuzji oraz zmniejszenia powierzchni przekroju poprzecznego, przez który gaz dyfunduje. W wielu przypadkach wartość dyfuzji zmniejsza się dziesięciokrotnie (2).

Jeżeli średnice porów w materiale są większe aniżeli swobodna droga cząsteczek pary wodnej, wówczas obowiązuje prawo dyfuzji Stefana (29), które wyrażone jest wzorem o postaci

$$\dot{m}_{pw} = -f \frac{D}{R_{pw} T} \frac{p}{p - \bar{p}_{pw}} \frac{dp_{pw}}{dl} = -f b \frac{dp_{pw}}{dl}, \quad (20)$$

gdzie

- $\dot{m}_{pw}$ - natężenie przepływu pary wodnej, kg/s,
- f - suma powierzchni przekroju porów, m^2 ,
- D - współczynnik dyfuzji pary wodnej w powietrzu, m^2/s ,
- R_{pw} - stała gazowa pary wodnej, J/(kg K),
- $\bar{p}_{pw}$ - średnie ciśnienie cząstkowe pary wodnej, N/m^2 ,

przy czym

$$\bar{p}_{pw} = \frac{p_n + p_{pw}}{2}, \quad (21)$$

gdzie p_n - ciśnienie nasycenia pary wodnej w danej temperaturze, N/m^2 ,

l - długość drogi ruchu w kierunku prostopadłym do powierzchni materiału, m,

b - współczynnik ruchu masy dla odparowania, równy

$$b = \frac{D}{R_{pw} T} \cdot \frac{p}{p - \bar{p}_{pw}}.$$

Równanie (20) nie ma jednak praktycznego zastosowania, gdyż nie jest znana zarówno wielkość f , jak i l .

Dla przypadku jednowymiarowego ruchu wilgoci przez materiały płaskie Krischer (30) ustalił wzór o postaci

$$\dot{m}_{pw} = -A \frac{D}{\mu} \cdot \frac{1}{R_{pw} T} \cdot \frac{p}{p - \bar{p}_{pw}} \cdot \frac{dp_{pw}}{dl}, \quad (22)$$

gdzie A - pole przekroju poprzecznego badanego materiału, m^2 ,

l - droga dyfuzji, m ,

μ - współczynnik oporu dyfuzyjnego.

W przypadku ciał, które zawierają obok porów wypełnionych gazem, kapilary wypełnione cieczą, ruch wilgoci występuje zarówno w wyniku dyfuzji pary, jak i przepływu kapilarnego. Natężenie ruchu wilgoci wyraża wówczas wzór o postaci (29):

$$\dot{m}_{H_2O} = -A \left[k \rho_s \frac{\partial u}{\partial l} + \frac{D}{\mu} \cdot \frac{1}{R_{pw} T} \cdot \frac{p}{p - \bar{p}_{pw}} \left(\frac{\partial p_{pw}}{\partial l} \right) \right], \text{ kg/s. } (23)$$

Dla materiałów higroskopijnych równanie (23) musi być rozszerzone w celu uwzględnienia wpływu wilgotności materiału na ciśnienie pary wodnej. W warunkach stałej temperatury obowiązujące w tym przypadku (29) wzór o postaci

$$\dot{m}_{pw} = -A \left[k \cdot \rho_s \cdot \frac{\partial u}{\partial l} + \frac{D}{\mu} \cdot \frac{1}{R_{pw} T} \cdot \frac{p}{p - \bar{p}_{pw}} \left(\frac{\partial p_{pw}}{\partial l} \cdot \frac{\partial u}{\partial l} \right) \right], \text{ kg/s. } (24)$$

Oznaczenia wielkości we wzorze 23 i 24:

k - współczynnik przewodzenia wilgoci, wywołany działaniem sił kapilarnych osmotycznych i Van Der Waalssche'a, m^2

ρ_s - gęstość suchego materiału, kg/m^3 ,

μ - zawartość wody w materiale, $kg/kg \text{ s.m.}$

W przypadku, gdy średnice porów są zbliżone do swobodnej drogi dyfundujących cząsteczek, zwłaszcza przy niskim ciśnieniu, mechanizm dyfuzji ulega całkowitej zmianie; mamy wtedy do czynienia z dyfuzją knudsenowską (29). Jeżeli ruch wilgoci jest jednokierunkowy, to zgodnie z równaniem Krischera (32) natężenie ruchu wilgoci może być wyrażone wzorem o postaci

$$\dot{m}_{pw} = - \frac{1}{g} f \cdot b_M \cdot \frac{dp_{pw}}{dl}, \text{ kg/s}, \quad (25)$$

gdzie f - suma pól poprzecznych przekrojów porów, m^2 ,

g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 ,

$\frac{dp_{pw}}{dl}$ - gradient ciśnienia pary wodnej, $\frac{N}{m^2} \cdot m^{-1}$,

b_M - współczynnik ruchu masy, wyprowadzony z podstawowych praw fizycznych, m/s ,

przy czym

$$b_M = \frac{4}{3} \left(d g \sqrt{\frac{1}{2\pi R} \frac{M}{T}} \right) = 5,83 \cdot 10^{-3} d g \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (26)$$

gdzie M - masa drobinowa pary wodnej, $kg/kmol$,

d - średnica porów, m ,

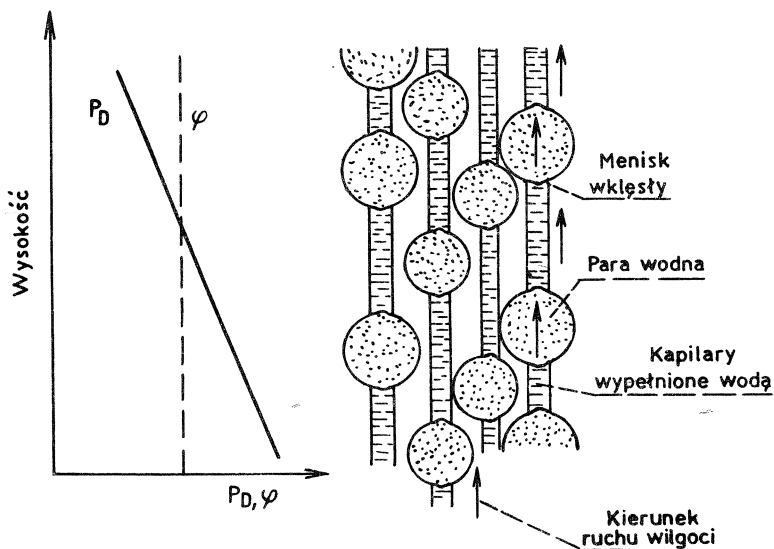
$\bar{R}$ - stała gazowa uniwersalna, $J/(kmol K)$,

T - temperatura bezwzględna, K .

Współczynnik b_M jest niezależny od ciśnienia.

Proces termodyfuzji występuje w związku ze zróżnicowaniem temperatury wilgotnego materiału, np. podczas suszenia, schładzania oraz przechowywania produktów rolniczych. Na rys. 2 przedstawiono w sposób schematyczny przebieg tego procesu.

Duże pory zawierają zazwyczaj gaz nawet wówczas, gdy zawartość wilgoci w materiale osiągnie znaczne wartości. Pory te po-

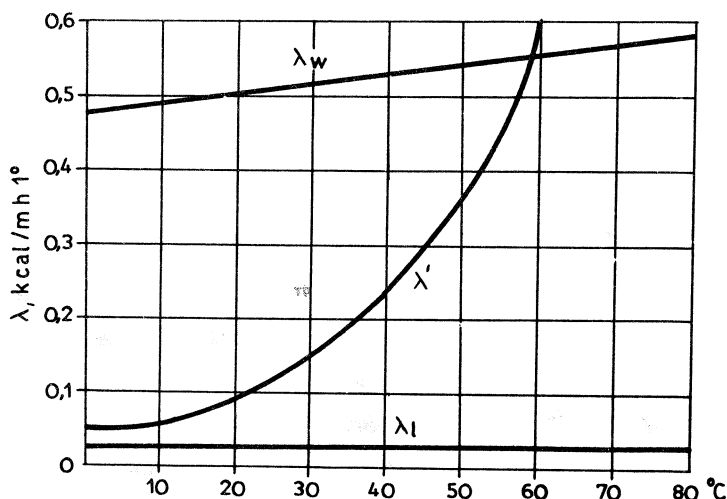


Rys. 2. Przeszczepianie się wilgoci w procesie dyfuzji pary wodnej w wilgotnych materiałach porowatych przy istnieniu gradientu temperatury (wg Krischera i Rohaltera 30)

łączone są między sobą drobnymi kapilarami wypełnionymi wodą. Jeżeli w materiale występuje spadek temperatury, stan równowagi nie może się ustalić. Woda odparowuje z kapilar po stronie cieplejszej, dyfunduje również w kierunku miejsc chłodniejszych w postaci pary, gdzie może nastąpić ponowne jej wykroplenie. Przeszczepianie wody przez kapilary jest wynikiem zróżnicowania napięcia powierzchniowego, dzięki czemu menisk cieczy w kapilarze po stronie parującej jest wklęsły, a ciśnienie parowania mniejsze niż po stronie skraplania. Woda przeszczepia się zatem w kierunku zmniejszającej się temperatury przenosząc ze sobą ciepło. Prędkość przeszczepiania się wilgoci zależy od natężenia dyfuzji tak długo, jak długo przez kapilary może być odprowadzana woda skraplająca się w porach. Udział termodyfuzyjnego prze-

noszenia ciepła nie może się utrzymać na maksymalnym poziomie, jeżeli wilgotność materiału tak zmaleje, że nie wszystkie ścianki porów pokryją się błonką wilgoci. Według Cammerera (9) granica wilgotności materiału, od której począwszy udział termodyfuzji zaczyna maleć, jest równa wilgotności równowagowej względem powietrza o wilgotności względnej 60%. Granice te zależą oczywiście od rodzaju kapilar w materiale.

Na rys. 3 (opracowanym przez Krischera) zilustrowano przewodność cieplną powietrza o charakterze molekularnym, a także molekularną przewodność wody oraz sumaryczną przewodność dyfuzyjną wywołaną zróżnicowaniem temperatury materiału.



Rys. 3. Zastępczy (równoważny) współczynnik przewodności cieplnej λ , powietrza zawartego w porach przy przewodzeniu i dyfuzji (wg Cammerera 9);

λ_l - współczynnik przewodności cieplnej powietrza,

λ_w - przewodność cieplna wody,

λ' - suma przewodności cieplnej powietrza oraz przewodności wywołanej dyfuzją pary wodnej

Zarówno powietrze, jak i woda wykazują nieznaczną zmienność wraz ze zmianą temperatury. Natomiast udział dyfuzyjnej wymiany ciepła szybko wzrasta z podwyższeniem się temperatury. Przy temperaturze 0°C jest on w przybliżeniu równy przewodności powietrza. Łączna przewodność przy temperaturze ok. 60°C osiąga wartość przewodności cieplnej wody w tej temperaturze. Według Cammerera (9) przewodność cieplna materiałów budowlanych w temperaturze 60°C jest niezależna od wilgotności materiału. Jest ona równa przewodności cieplnej przy całkowitym wypełnieniu porów wodą. Powyżej tej temperatury materiał wilgotny przewodzi energię cieplną lepiej niż materiał całkowicie nasycony wilgocią co ilustruje ryc. 4. Rys. 5 jest syntezą rys. 3 i rys. 4.

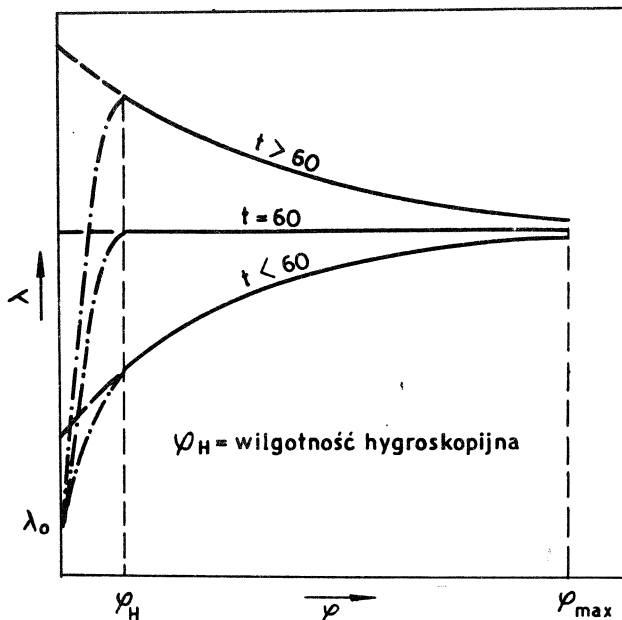
Według Cammerera (6) równoważny współczynnik przewodności cieplnej powietrza w porach materiałów wilgotnych wynosi:

$0,04 \text{ kcal}/(\text{m h}^{\circ}\text{C})$ - przy 0°C ,

$0,05 \text{ kcal}/(\text{m h}^{\circ}\text{C})$ - przy 10°C ,

$0,08 \text{ kcal}/(\text{m h}^{\circ}\text{C})$ - przy 20°C .

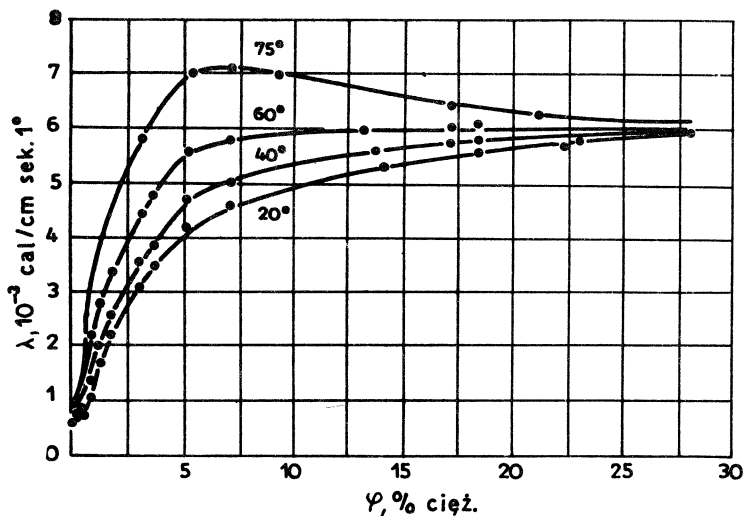
Materiały liczbowe, dotyczące wpływu wilgotności na przewodność cieplną są jeszcze bardzo niekompletne, a często rozbieżne co wynika z trudności pomiarowych. Warunkiem prawidłowo przeprowadzonych badań nad przewodnością ciepła materiałów wilgotnych jest utrzymanie w całej badanej masie równomiernej wilgotności. Jest to warunek niemożliwy do spełnienia przy użyciu klasycznych metod pomiarowych. Zróżnicowanie temperatury powoduje przemieszczanie wilgoci w badanej warstwie, przy czym materiał na cieplejszej powierzchni może całkowicie wyschnąć. Jeżeli założy się równomierny rozkład wilgotności w badanej warstwie materiału, a faktycznie w czasie pomiaru wilgotność jest



Rys. 4. Współczynnik przewodności cieplnej wilgotnych materiałów w funkcji zawartości wilgoci przy różnych temperaturach (wg Krischera 32)

zróżnicowana, to uzyskuje się zbyt duże wartości współczynnika przewodności cieplnej (9).

Pabis i Gadał (48-50) przeprowadzili badania nad zależnością przewodności cieplnej warstwy ziarna pszenicy, jęczmienia i kukurydzy, a także nasion bobiku, fasoli, grochu, łubinu i rzepaku od zawartości wody. Wyniki tych badań, przedstawiono wykreślnie na rys. 6. Pozwoliły one autorom na wyciągnięcie ważnych wniosków: zależność zredukowanej przewodności cieplnej (stosunku przewodności cieplnej materiału o danej zawartości wody do jej wartości dla suchej masy) od zawartości wody ma charakter prosto-



Rys. 5. Współczynnik przewodności cieplnej piasku w funkcji zawartości wilgoci (wyrażonej udziałem masowym w stosunku do suchej substancji) dla temperatur 20°C, 40°C, 60°C i 75°C (wg Cammerera 9)

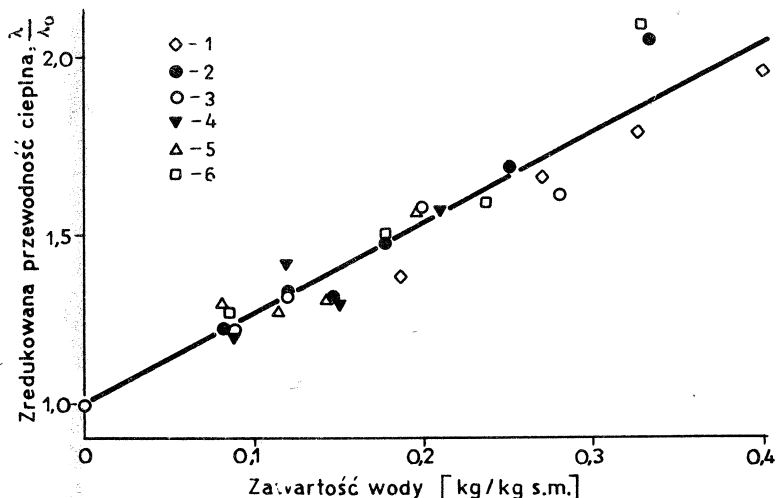
liniowy, natomiast związek pomiędzy przewodnością cieplną i zawartością wody (dla wszystkich badanych nasion) można wyrazić wzorem o postaci

$$\lambda = \lambda_0 + 2,668 u, \quad (27)$$

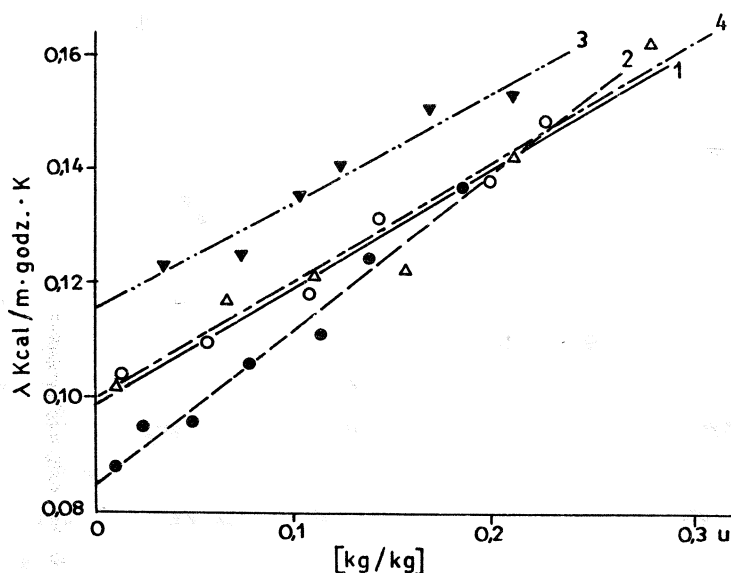
gdzie λ_0 - przewodność cieplna suchej masy badanych ciał
kcal)m h°C,

u - zawartość wody, kg H₂O/kg s.m.

Gadał i Cybulska (15) wykonali badania nad przewodnością cieplną warstwy pszenicy, żyta, jęczmienia i owsa w zależności od zawartości wody zmienianej w zakresie 0 - 0,3 kg H₂O/kg s.m. Temperatura warstwy podczas pomiarów wahała się w granicach 20 - 80°C. Wyniki z przeprowadzonych badań przedstawia rys. 7.



Rys. 6. Zależność zredukowanej przewodności cieplnej od zawartości wody w nasionach; 1 - kukurydzy, 2 - bobiku, 3 - fasoli, 4 - grochu, 5 - łubinu, 6 - rzepaku (wg Pabisa 50)



Rys. 7. Zależność przewodności cieplnej warstwy zbóż od zawartości wody; 1 - jęczmień, 2 - owies, 3 - pszenica, 4 - żyto (wg Gadaja i Cybulskiej 15)

Stwierdzili oni, że zależność przewodności cieplnej warstwy ziarna czterech podstawowych zbóż od zawartości wody w zakresie $0 \leq u \leq 0,3$ można aproksymować za pomocą prostej o postaci

$$\lambda = \lambda_0 + a u, \quad (28)$$

gdzie λ_0 , a - współczynniki wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów dla każdego rodzaju ziarna.

Okazało się, że zależność zredukowanej przewodności cieplnej warstwy żyta, pszenicy i jęczmienia można opisać za pomocą jednego równania o postaci

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + 1,882 u, \quad (29)$$

natomiast warstwy owsa - równania

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + 3,110 u. \quad (30)$$

Obliczone przez autorów wartości współczynnika przewodności cieplnej suchej masy λ_0 wynoszą:

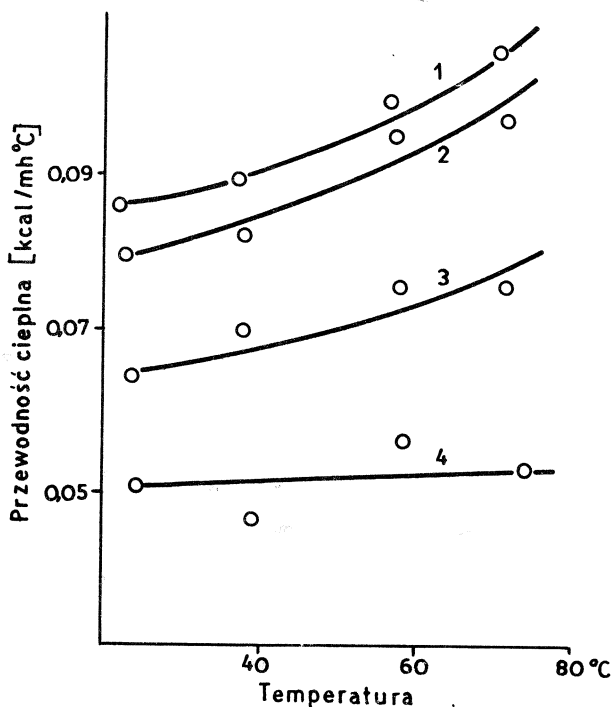
dla pszenicy	- 0,115 kcal/(m h°C),
żyta	- 0,100 kcal/(m h°C),
jęczmienia	- 0,099 kcal/(m h°C),
owsa	- 0,085 kcal/(m h°C).

Roskacz (55) zbadał zależność przewodności cieplnej zielonki konicznej od wilgotności w zakresie 0 - 75% oraz od temperatury w przedziale od 25- 75°C. Badacz ten stwierdził wzrost wartości współczynnika przewodności cieplnej wraz ze zwiększaniem się wilgotności konicznej przy stałej gęstości objętościowej (rys.8). Wykazał on również, że wartość tego współczynnika dla absolutnie suchej konicznej nie zmienia się w zależności od temperatury w zakresie $t = 25 - 75^\circ\text{C}$. Wzrost przewodności cieplnej wilgotnej

koniczyny wraz ze zwiększeniem temperatury autor tłumaczy intensyfikacją promieniowania ciepła w przestrzeniach wypełnionych gazem.

Zależność ciepła właściwego od wilgotności ewentualnie od zawartości wody jest zazwyczaj (2,21,47,56) przedstawiana w postaci równań

$$c = c_s \frac{100 - w}{100} + \frac{w}{100} c_{H_2O}, \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}, \quad (31)$$



Rys. 8. Zależność przewodności cieplnej koniczyny od temperatury dla różnych wilgotności; 1 - 75%, 2 - 60%, 3 - 40%, 4 - 0% (wg Roskacza 55)

gdzie c - ciepło właściwe wilgotnego ciała, kJ/kg K ,
 c_s - ciepło właściwe suchej masy, kJ/kg K ,
 w - wilgotność, %,

lub

$$c = c_s + u \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \quad (32)$$

Według Jegorowa i Ljubuszki (21) ciepło właściwe wilgotnych ziarn kukurydzy wynosi

$$c = 0,267 + u \quad (33)$$

Badania nad wpływem zawartości wody na ciepło właściwe kłębów ziemniaczanych, przeprowadzone przez Kamińskiego (22,23) wykazały, że zależność ta nie ma charakteru liniowego. Można ją wyrazić w formie równań o postaci

$$c = 0,0072 w + 0,395 \quad (34)$$

lub

$$c = \frac{0,72 u}{1 + u} + 0,395 \quad (35)$$

Pomiary ciepła właściwego kłębów ziemniaczanych zostały przeprowadzone metodą nieustalonej wymiany ciepła w płycie nieograniczonej oraz metodą kalorymetryczną, przy czym obie metody dały niemal identyczne wyniki.

Nieliniową zależność pomiędzy zawartością wody i ciepłem właściwym autor tłumaczy zróżnicowaniem ciepła właściwego wody w zależności od sposobu jej wiązania, opierając się na badaniach Nikitiny, Beriezina i Kusielewa oraz innych.

Zależność ciepła właściwego od temperatury (dla absolutnie suchego cukru) podał Pabis (47) za Ginsburgiem w formie zależności o postaci

$$c_s = 0,2775 + 0,00085 t \quad (36)$$

2.3. Właściwości cieplne materiałów w zależności od form wiązania wilgoci

Termofizyczne i technologiczne właściwości hydrofilnych materiałów organicznych zależą nie tylko od ich wilgotności, ale również od formy wiązania wilgoci (33,36,38). Jeżeli weźmie się pod uwagę takie czynniki, jak energia wiązania wody, ciepło właściwe wody, jednostkowe ciepło izotermicznego parowania itp. to (25,43,44), można wyróżnić cztery formy wiązania wody z ciałami koloidalnymi, kapilarno-porowatymi, do jakich należy zaliczyć produkty rolnicze, tj.

- 1) wiązania chemiczne,
- 2) wiązania adsorpcyjne,
- 3) wiązania osmotyczne,
- 4) wiązania kapilarne.

Klasyfikacja ta w sensie merytorycznym jest zgodna z zaproponowanym przez Rebindera (54), powszechnie przyjętym, podziałem wiązań wilgoci na trzy klasy tj.

- 1) wiązania chemiczne (stechiometryczne) - woda jest związana jonowo lub molekularnie w ścisłych stosunkach molowych,
- 2) wiązania fizyko-chemiczne - woda związana w różnych nie ściśle określonych stosunkach. Należy tu woda adsorpcyjna i osmotyczna, a także tzw. wilgoć strukturalna, biorąca udział np. w procesie pęcznienia ciał,
- 3) wiązania mechaniczne - woda związana w kapilarach oraz na powierzchni ciał.

Wody związanej chemicznie nie usuwa się z materiałów, aby nie zmienić ich właściwości.

Takie cechy produktów rolniczych, jak hydrofilność, przewodność cieplna, dyfuzyjność i in., ze względu na strukturę kapi-

laro-porowatą, wydają się być mniej uzależnione od składu chemicznego, a bardziej od struktury molekularnej, tj. od zawartości ciał krystalicznych i bezpostaciowych - podobnie jak materiały izolacyjne i budowlane o dużej porowatości. Tłuszcze zawarte w produktach rolniczych są ciałami bezpostaciowymi (mikrokryształami), co powoduje, że nie mają one właściwości higroskopijnych, w odróżnieniu od substancji wchodzących w skład tzw. kompleksu białkowo-skrobiowego, który zawierając krystaloidy, posiada właściwości higroskopijne. Olbrzymie znaczenie wydaje się mieć rodzaj oraz zawartość uwodnionych związków soli mineralnych tj. hydratów. Jak wiadomo, hydraty mają zróżnicowane dawki dysocjacji. Właściwość ta decyduje o ich zachowaniu w określonej wilgotności i temperaturze powietrza; mogą one pochłaniać parę wodną, ewentualnie ją oddawać. Znając dawki dysocjacji hydratów oraz ciśnienie pary wodnej przy danej temperaturze powietrza, w łatwy sposób można obliczyć energię wiązania wilgoci (44). Według wielu badaczy (12,25,43,44,54), wielkość zwana energią wiązania wody (ewentualnie adsorpcyjnym potencjałem ϵ) określa najbardziej prawidłowo formy wiązania wilgoci, przy czym dla $T = \text{const}$

$$\epsilon = \bar{R} T \ln \frac{v_u}{v_s}, \quad \text{J/mol}, \quad (37)$$

gdzie $\bar{R}$ - uniwersalna stała gazowa, J/(mol K),

T - temperatura, K,

v_u, v_s - objętość 1 mola pary wodnej w powietrzu oraz jej objętość po zaadsorbowaniu na powierzchni ciała stałego, m^3/mol .

Jeżeli cząsteczka przy adsorpcji oddaje adsorbentowi lub pobiera od niego elektrony - to występuje tzw. chemisorpcja, gdy

natomiast zachowuje swą indywidualność - ma miejsce adsorpcja fizyczna.

Wiadomo, że największa energią wiązania wody cechuje się pierwsza jej warstewka na powierzchni ciała stałego, a każda następna warstwa jest związana słabiej od poprzedniej. Adsorpcji wilgoci towarzyszy wydzielanie ciepła przy tworzeniu warstwy monomolekularnej. Maksymalne ciepło adsorpcji dla pszenicy wynosi $129,79 \cdot 10^{-4}$ J/kg H_2O , dla maki $184,22 \cdot 10^{-4}$ J/kg H_2O , a dla krochmalu $131,88 \cdot 10^{-4}$ J/kg H_2O (44).

Woda związana adsorpcyjnie posiada szereg właściwości, które odróżniają ją od zwykłej wody. Jest ona bowiem znacznie gorszym rozpuszczalnikiem, niż woda swobodna. Ciepło właściwe wody adsorpcyjnej zmniejsza się tak znacznie, że jest bliskie ciepłu właściwemu lodu, natomiast jej gęstość rośnie. Według Nikitiny (44) wzrost gęstości wody adsorpcyjnej do $1,4 - 1,7 \text{ g/cm}^3$ łączy się prawdopodobnie z występowaniem ciśnienia rzędu kilkudziesięciu atmosfer.

Woda związana adsorpcyjnie, ze względu na ograniczoną swobodę ruchu molekuł, ma także mniejsze ciśnienie pary nasyconej. Zamarza ona przy znacznie niższych temperaturach, niż woda wolna (do -78°C).

Produkty rolnicze, jako ciała koloidalne można traktować jako pseudokapilarno-porowate, u których rozmiary mikrokapilarów są zależne od wielkości molekuł (29). Proces zwilżania tych ciał ma dwa stadia;

- 1) adsorpcja z wydzielaniem ciepła,
- 2) przyłączenie wilgoci bez wydzielania ciepła poprzez osmotyczne przenikanie międzykomórkowe.

Motorem osmozy jest zróżnicowanie koncentracji swobodnych mole-

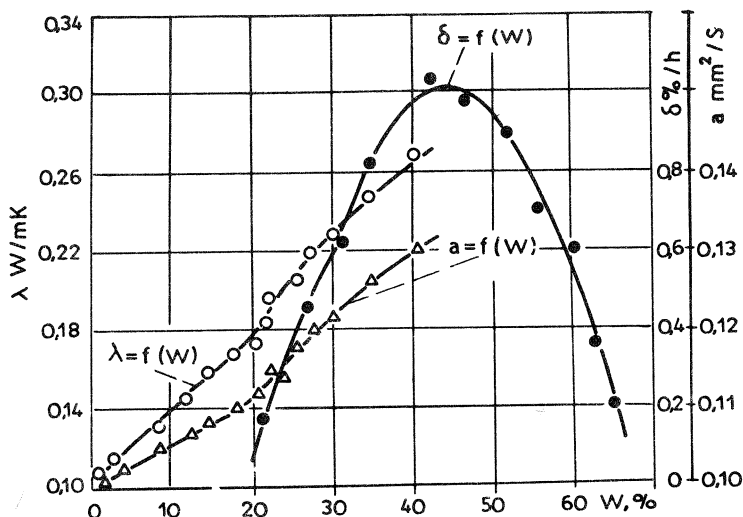
kuł rozpuszczalnika w roztworach oddzielonych błoną półprzepuszczalną, które powoduje samorzutny ruch cząsteczek rozpuszczalnika, wraz z rozpuszczonymi w nim składnikami.

Mechaniczne wiązanie wody polega na jej gromadzeniu na powierzchni i w kapilarach (29,47). Wolgość powierzchniową stanowi warstewka cieczy pokrywająca powierzchnię materiałów. Istotną cechą tego rodzaju wilgoci jest równość ciśnienia cząstkowego pary nad powierzchnią zwilżonego ciała i ciśnienia nasycenia pary przy danej temperaturze (29).

Właściwości wilgoci kapilarnej są uzależnione od rozmiarów kapilarów lub porów. W przypadku dużej ich średnicy ciśnienie cząstkowe pary nad powierzchnią cieczy w porach jest równe ciśnieniu odpowiadającemu temperaturze materiału, który w tej sytuacji nie wykazuje właściwości higroskopijnych. Gdy pory mają bardzo małe rozmiary (promień mniejszy od 10^{-7} m) ciśnienie cząstkowe pary nad powierzchnią cieczy jest znacznie mniejsze od ciśnienia nad swobodną powierzchnią - tym mniejsze, im węższe są kapilary (29).

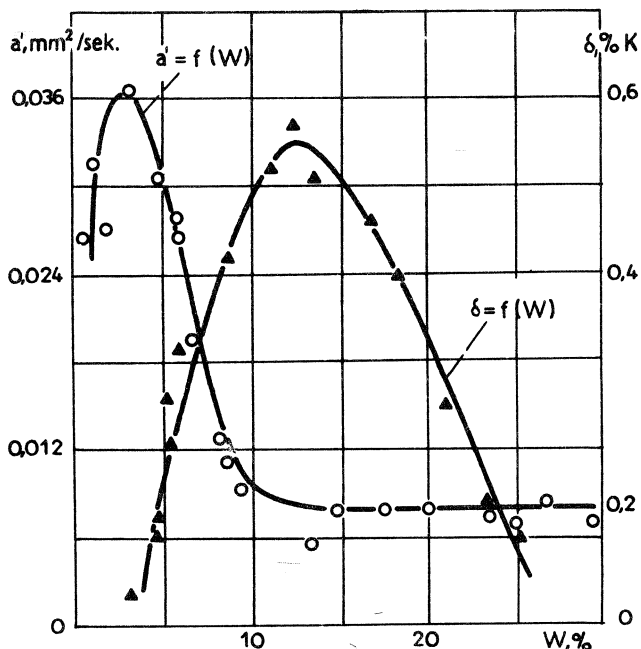
Wilgoć komórkowa (strukturalna) powoduje pęcznienie i stanowi integralną część składową ciał koloidalnych. Proces pęcznienia sprawia, że komórki są przepuszczalne zarówno dla wody jak i jej pary (29).

Prace badawcze nad przewodnością ciepła λ , termodyfuzją δ i przewodnością temperatury α produktów roślinnych i gleb zostały zapoczątkowane przez Łykowa (36) oraz są kontynuowane przez wielu badaczy, m.in. Duszenkę i Kulandinę, a jeżeli chodzi o ciepło parowania - przez Kazańskiego. Badania nad zależnością wartości współczynników λ , α , δ od wilgotności dla maki pszennej (rys. 9) wykazały, że istnieje ścisły związek pomiędzy tymi



Rys. 9. Krzywe zależności współczynników przewodzenia ciepła λ oraz wyrównywania temperatury a , a także współczynnika termogradientnego δ od wilgotności, dla mąki pszennej I gat. (wg Duszenki 12)

czynnikami. W przedziale wilgotności 0 - 20% (co odpowiada wilgoci zaadsorbowanej w warstwie monomolekularnej) zależność przewodności ciepła i przewodności temperatury od wilgotności ma charakter prostoliniowy. Wartość współczynnika λ w tym zakresie wilgotności rośnie od 0,10 J/(m K) do 0,18 J/(m K), natomiast współczynnika a od 0,10 mm²/s do 0,11 mm²/s (12). Przy wilgotności 20% (w zakresie adsorpcji polimolekularnej aż do higroskopijnej) wartość tych współczynników wzrasta intensywnie. Przy wilgotności 40% $\lambda = 0,26$ J/(m K), natomiast $a = 0,13$ mm²/s. Wartość współczynnika termogradientnego osiągnęła maksimum ($\delta = 1\%/K$) przy wilgotności 40 - 45% oraz wartości bliskie zero przy wilgotności ok. 20% i 65%. Dla takich produktów jak krochmal i kakao zależność $\lambda = f(w)$ i $a = f(w)$ okazała się analo-



Rys. 10. Krzywe zależności współczynnika potencjału przewodzenia wilgoci a' oraz współczynnika termogradientnego δ od wilgotności dla gleby gliniastej - $\delta_0 = 1320 \text{ kg/m}^3$ (wg Duszenki 12)

giczna (12). Wyniki badań nad zależnością potencjału przewodności wilgoci a' oraz współczynnika termogradientnego od wilgotności ilustruje rys. 10.

Wynika z niego, że w przypadku gleby gliniastej w zakresie wilgotności odpowiadającej adsorpcji monomolekularnej, współczynnik termogradientny jest równy zero (efuzyjne ciśnienie pary nie pozwala na przeniesienie wilgoci - wymiana ciepła odbywa się przez przewodzenie). Przy wilgotności zwiększającej się od 3% do 12% współczynnik termogradientny wzrasta do ok. 0,55%/K. Osiąga on maksimum przy wilgotności higroskopijnej. Dalsze

zwiększanie wilgotności powodowało zmniejszenie wartości współczynnika termogradientnego (przy $w = \text{ok. } 25\%$ jest on bliski zeru). Zwiększenie gęstości gleby gliniastej wpływało na zmniejszenie wartości współczynnika termogradientnego (36).

Zróznicowania wartości współczynników λ , a , δ , a' , w zależności od sposobu wiązania wilgoci w materiale, Żyłow (35) tłumaczy w następujący sposób: przy wilgotności odpowiadającej w przybliżeniu adsorpcji monomolekularnej ruch wilgoci zachodzi w postaci pary poprzez dyfuzję. Współczynnik potencjału przewodzenia wilgoci a' osiąga wtedy maksymalne wartości. Zwiększenie wilgotności powoduje obniżenie wartości a' . Po osiągnięciu wilgotności higroskopijnej wzrasta część wilgoci przenoszanej w postaci cieczy. Ciecz przenosi się nie tylko pod wpływem sił kapilarnych, ale w drodze osmozy. Przy dalszym wzroście wilgotności współczynnik a' pozostaje niezmienny, co w znacznym stopniu upraszcza analityczne opracowanie zagadnienia ruchu wilgoci w materiałach.

Według Lisowienki (34) metoda pomiaru własności cieplnych artykułów żywnościowych musi spełniać następujące warunki:

- 1) okres ogrzewania próby materiału powinien być krótki, aby nie zachodziły procesy zmieniające własności cieplne,
- 2) wzrost temperatury w okresie ogrzewania nie powinien być większy niż $5 - 10^{\circ}\text{C}$, ponieważ własności cieplne zależą także od temperatury,
- 3) własności cieplne należy określać dla średniej temperatury próby,
- 4) metoda pomiaru powinna zapewniać możliwość powtórzenia badania bez zmiany położenia elementów pomiarowych w materiale,

- 5) wszystkie wielkości zmieniające się, mierzone w doświadczeniu należy rejestrować na przyrządach samopiszących, aby wykluczyć błędy subiektywne,
- 6) element pomiarowy wprowadzony do materiału badanego nie powinien zmieniać jego struktury.

3. METODY POMIARU WSPÓŁCZYNNIKÓW PRZEWODNOŚCI CIEPLINEJ, PRZEWODNOŚCI TEMPERATURY I CIEPŁA WŁAŚCIWEGO

Poznanie właściwości cieplnych poszczególnych produktów rolniczych stanowi podstawę przy opracowywaniu techniki i technologii ich suszenia, chłodzenia, przechowywania itp. W nauce światowej znanych jest wiele metod wyznaczania właściwości cieplnych materiałów izolacyjnych i budowlanych. Znajomość tych metod oraz adaptacja ich do pomiaru wielkości cieplnych produktów rolniczych może być w niektórych przypadkach korzystniejsza niż szukanie całkowicie nowych rozwiązań. Tym bardziej, że niektóre produkty rolnicze swoją strukturą i właściwościami fizycznymi są zbliżone do materiałów izolacyjnych. Na ogół jednak produkty rolnicze cechuje znaczne zróżnicowanie właściwości fizycznych, co wymaga stosowania różnorodnych metod pomiarowych. Ich cechą szczególną jest również znaczna wilgotność, wahająca się w zależności od rodzaju produktu w granicach 6-80%.

W opracowaniu podane są metody pomiaru współczynnika przewodności cieplnej, a także współczynnika wyrównywania temperatury, w warunkach ustalonego oraz nieustalonego stanu cieplnego. Opisano stanowiska pomiarowe wraz z wyposażeniem, a także omówiono technikę pomiarów i wyznaczania poszczególnych współczynników. Opracowanie zawiera również ogólne założenia do projektu stanowiska pomiarowego dla materiałów ziarnistych.

3.1. Pomiary wielkości cieplnych w warunkach ustalonego stanu cieplnego

Do pomiaru wartości współczynnika przewodzenia ciepła ciał twardych, sypkich i włóknistych o małych wartościach tego współczynnika służą aparaty płytowe. Na szczególną uwagę zasługują aparaty Poensgena (7,51).

3.1.1. Aparat dwupłytowy Poensgena (54)

Próbki materiału w formie dwóch płyt o wymiarach ok. 500×500 mm i grubości 20 - 40 mm umieszcza się po obu stronach grzejnika elektrycznego (rys. 11). Grzejnik składa się z dwu części; element 6, tzw. grzejnik wewnętrzny o wymiarach 250×250 mm znajduje się we wnętrzu grzejnika zewnętrznego 7 w kształcie ramy, o szerokości 100 mm. Do próbek przylegają chłodnice 8 i 9, przez które przepływa woda. Ciepło wytworzone przez grzejnik 6 i 7 przewodzone jest przez badane próbki i oddawane wodzie przepływającej przez chłodnice. Zadaniem zewnętrznego elementu grzejnego jest pokrycie strat ciepła w kierunkach bocznych. W odniesieniu do części stykającej się z grzejnikiem wewnętrznym, obliczanie ilości przewodzonego ciepła Q dokonuje się przy pomocy równania dla ściany płaskiej, które ma postać

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F (t_w - t_z) \tau, \quad (38)$$

gdzie λ - współczynnik przewodzenia ciepła,

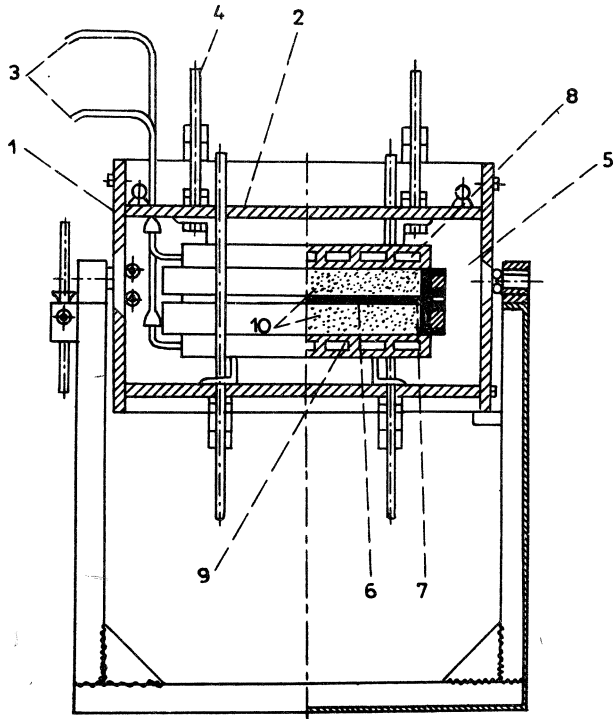
δ - grubość ścianki,

F - powierzchnia ścianki,

t_w - temperatura powierzchni wewnętrznej,

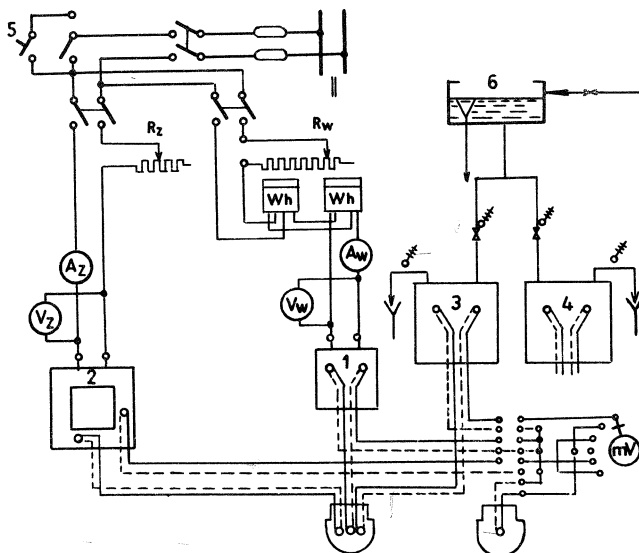
t_z - temperatura powierzchni zewnętrznej,

τ - czas.



Rys. 11. Dwupłytowy aparat Poensgena; 1 - skrzynia, 2 - pokrywa, 3 - doprowadzenie wody, 4 - śruby dociskowe, 5 - izolacja korkowa, 6 - grzejnik wewnętrzny, 7 - grzejnik zewnętrzny, 8 i 9 - chłodnice, 10 - próbki badanego materiału

W celu wyrównania temperatury powierzchnie grzejnika wykonane są z 3 mm blachy miedzianej. Pomiar temperatury odbywa się za pomocą termoelementów umieszczonych na powierzchniach obu grzejników i powierzchniach chłodnic przylegających do badanych próbek. Odczytu temperatury dokonuje się za pomocą miliwoltomierza lub układu kompensacyjnego (rys. 12). Przebieg temperatur w czasie można rejestrować za pomocą wielopunktowego rejestratora.



Rys. 12. Schemat stanowiska wyposażonego w aparat Poensgena;
 1 - grzejnik wewnętrzny, 2 - grzejnik zewnętrzny,
 3, 4 - chłodnice, 5 - wyłącznik zegarowy, 6 - naczynie przelewowe

Wyrównanie się temperatur na powierzchniach grzejnika wewnętrznego i zewnętrznego świadczy o tym, że nie ma strat ciepła przez powierzchnie boczne.

Regulacja ilości energii doprowadzonej do grzejników odbywa się za pomocą oporników włączonych szeregowo w obwód odpowiednich odbiorników. Pomiar mocy uzyskuje się za pomocą amperomierza, które są włączone w obwód grzejnika wewnętrznego. Dla kontroli i orientacji zainstalowane są dwa liczniki kilowatogodzin. W celu szybszego doprowadzenia układu do równowagi cieplnej podłączony jest amperomierz i woltomierz w obwód grzejnika zewnętrznego. Równomierny dopływ wody do aparatury zapewnia naczynie przelewowe. Za pomocą kurków ustala się jednakową ilość

wody przepływającej przez obie chłodnice. Na dopływie i odpływie wody z chłodnic w celach kontrolnych umieszczone są termometry. Odpowiednie temperatury powinny być równe między sobą i stałe przez cały okres pomiarowy. Próbkę materiału izolacyjnego w formie płyt muszą być doszlifowane do powierzchni chłodnicy grzejników. Na ich powierzchni należy wykonać rysy, w których ułożone zostaną termopary. Przed umieszczeniem próbek w aparacie należy zmierzyć ich grubość, która powinna być jednakowa dla obu elementów.

Doszlifowanie płyt ma na celu stworzenie dobrego styku ich powierzchni z powierzchniami wymienników ciepła. Istnienie warstw powietrza powoduje fałszywe określenie współczynnika λ . Jednym ze sposobów uniknięcia przestrzeni powietrznych jest wypełnienie luk proszkiem otrzymanym przez starcie badanego materiału. Po założeniu próbek i sprawdzeniu termoelementów zasypuje się cały zestaw korkiem drobionym, po czym zakłada się pokrywę i przez wywołanie nacisku za pomocą śrub zapewnia przyleganie badanego materiału do powierzchni wymienników.

Następnie włącza się grzejniki elektryczne, otwiera dopływ wody do chłodnic i reguluje w ten sposób, by do obu dopływała ta sama jej ilość.

Regulację ilości ciepła za pomocą oporników prowadzi się tak, by uzyskać równość temperatur na powierzchni grzejnika wewnętrznego i zewnętrznego.

Po stwierdzeniu ustalenia się równowagi cieplnej całego układu przystępuje się do pomiaru, który winien trwać minimum dwie godziny. W okresie pomiaru wstępnego i właściwego dokonuje się odczytu następujących wielkości:

$t_z = t_1$ - temperatury powierzchni chłodnicy,

$t_w = t_2$ - temperatury powierzchni grzejnika wewnętrznego,

t_3 - temperatury powierzchni grzejnika zewnętrznego,

I_w, U_w - natężenia i napięcia w obwodzie grzejnika wewnętrznego,

τ - czasu.

Odczyty dokonywane są w odstępach 5 - 10 minutowych. Z otrzymanych podczas pomiaru właściwego danych oblicza się wartości średnie. Ilość ciepła dostarczana przez grzejnik wynosi

$$Q = N\tau, \quad (39)$$

gdzie N - moc grzejnika wewnętrznego.

Wobec tego, że w omawianym układzie pomiarowym amperomierz A_w wskazuje sumę prądów płynących przez grzejnik i woltomierz, to

$$N = U_w I_w - \frac{U_w^2}{R}, \quad (40)$$

gdzie R - opór woltomierza.

Zatem w ciągu jednostki czasu ilość ciepła dostarczana przez grzejnik wyniesie $\dot{Q} = N$.

Po przekształceniu równania (38) otrzymamy

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{2F (t_w - t_z)} \quad (41)$$

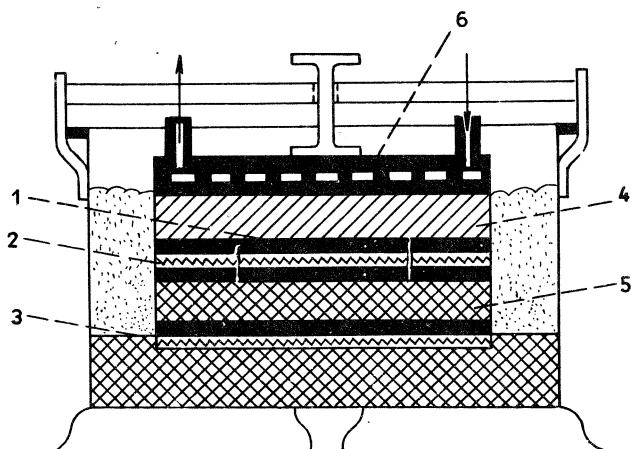
dla średniej temperatury

$$t_m = \frac{t_w + t_z}{2}.$$

W równaniu (41) występuje $2F$ ponieważ ciepło dostarczone przez grzejnik wewnętrzny jest przewodzone przez dwie warstwy. Powierzchnia F określona jest wymiarami grzejnika wewnętrznego.

3.1.2. Aparat jednopłytowy (7,9)

Jest to odmiana aparatu Poensgena. Schemat aparatu jednopłyтового przedstawiony jest na rys. 13, natomiast na rys. 14 pokazano schemat stanowiska wyposażonego w aparat jednopłytowy.

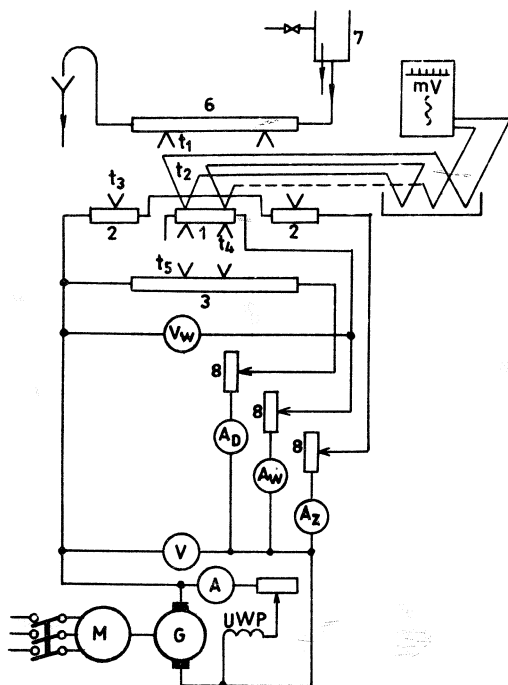


Rys. 13. Aparat jednopłytowy; 1 - grzejnik wewnętrzny, 2 - grzejnik zewnętrzny, 3 - grzejnik pomocniczy, 4 - badana próbka, 5 - płyta pomocnicza, 6 - chłodnica

Zastosowane są dwa grzejniki elektryczne: wewnętrzny 1 o średnicy 100 do 150 mm i zewnętrzny 2, w kształcie pierścienia o średnicy 200 do 250 mm, mający za zadanie pokrycie strat w kierunku promieniowym. Grzejniki wykonane są z dwóch warstw blachy miedzianej. Cała ilość ciepła dostarczona przez grzejniki przewodzona jest przez próbkę 4 i przekazywana wodzie chłodzącej, przepływającej przez chłodnicę 6. Pomocniczy grzejnik 3 i pomocnicza płyta z materiału izolacyjnego zabezpieczają przed stratami ciepła w kierunku dna skrzynki aparatu. Regulację grzej-

ników 1 i 2 przeprowadza się w ten sposób, co w aparacie Poensgena, natomiast regulację grzejnika pomocniczego 3 przeprowadza się tak, by po obu stronach pomocniczej płyty 5 były jednakowe temperatury.

W aparacie tym próbki posiadają mniejszą powierzchnię, niż w aparacie dwupłytowym, co jest jego zaletą, ponieważ osiąga się lepszy styk z wymiennikami ciepła.



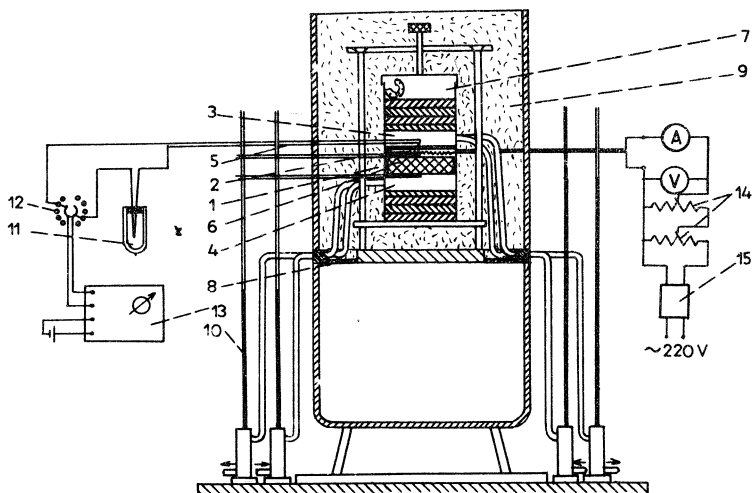
Rys. 14. Schemat stanowiska wyposażonego w aparat jednopłytowy; 1 - grzejnik wewnętrzny, 2 - grzejnik zewnętrzny, 3 - grzejnik pomocniczy, 4 - badana próbka, 5 - płyta pomocnicza, 6 - chłodnica, 7 - naczynie przelewowe, 8 - oporniki suwakowe, t_1 - T_5 punkty pomiaru temperatury.

Aparat ten w porównaniu z dwupłytkowym wymaga mniejszego czasu do osiągnięcia równowagi cieplnej.

3.1.3. Zminiaturyzowany aparat płytowy

Na rys. 15 przedstawiony jest schemat zminiaturyzowanego aparatu płytowego, na którym Gogół (16) wykonał badania przewodności cieplnej ziemniaków i buraków cukrowych. Pomiar dokonywany był w ustalonym stanie cieplnym.

Badana próbka miała wymiary 50×50 mm przy grubości kilku milimetrów. Na powierzchni próbki utrzymana była różnica o



Rys. 15. Schemat zminiaturyzowanego aparatu płytowego; 1-badana próbka, 2-grzejnik, 3 - chłodnica górna, 4 - chłodnica dolna, 5 - termoelementy, 6 - ramka z plexi, 7 - urządzenie do pomiaru nacisku, 8 - urządzenie do przesypywania izolacji, 9 - izolacja cieplna, 10 - termometry, 11 - termostat, 12 - przełącznik termoelementów, 13 - kompensator, 14 - autotransformatory, 15 - stabilizator napięcia

5 - 10°C. Stan równowagi cieplnej osiągany był zwykle po około 1 godzinie, natomiast całkowity czas trwania pomiaru wynosił 1,5 godz. Obie chłodnice zasilane były wodą z ultratermostatów. Moc grzejnika regulowano układem kaskadowym dwóch autotransformatorów i mierzono woltomierzem oraz amperomierzem klasy 0,2. Układ zasilano prądem zmiennym stabilizowanym. Temperaturę grzejnika i obu chłodnic mierzono termoelementami miedź-konstantan o średnicy 0,1 mm. Dodatkowo temperaturę chłodnic kontrolowano poprzez pomiar temperatury wody wpływającej i wypływającej z chłodnicy. Cały układ pomiarowy izolowany był styropianem.

Przewodność cieplną λ dla średniej temperatury obliczono z zależności

$$\lambda = \frac{\dot{Q}\delta}{(t_g - t_{ch}) F} - K, \quad (42)$$

gdzie $\dot{Q}$ - ciepło wydzielone w grzejniku, kW,

t_g - temperatura grzejnika, °C,

t_{ch} - temperatura chłodnicy dolnej, °C,

F - pole przekroju próbki, m²,

δ - grubość próbki, m.

Zminiaturyzowany aparat płytowy nie ma ochronnego (bocznego) grzejnika i chłodnicy, a wynikające stąd straty ciepłe uwzględniano poprzez wyznaczenie dla tego aparatu poprawki K ;

$$K = \frac{\delta}{t_g - t_{ch}} \left[a + b \left(\frac{t_g - t_{ch}}{2} \right) - t_o \right], \quad (43)$$

gdzie a i b oznaczają stałe dla danego aparatu,

t_o - temperatura otoczenia.

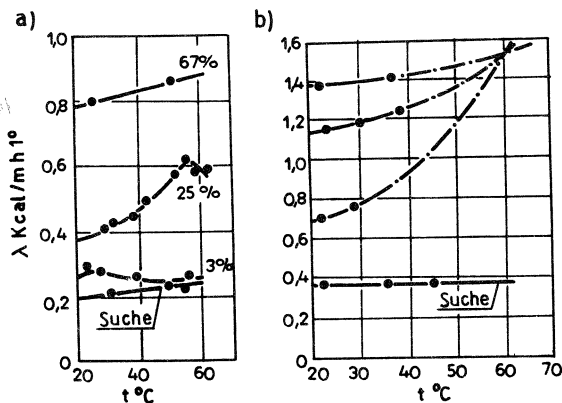
Pomiary przewodności cieplnej przeprowadzono przy nacisku w zakresie $9,8 \cdot 10^3 - 4,9 \cdot 10^4$ N/m². Gogół (16) stwierdził, że

zminiaturyzowany aparat płytowy pozwala na wyznaczenie współczynnika przewodności cieplnej buraków cukrowych i ziemniaków. Zauważył również, że nacisk na próbkę wywiera wpływ na wartość przewodności cieplnej.

Według Cammerera (9) w aparatach płytowych mogą być badane jedynie próbki w stanie suchym lub powietrzno-suchym, natomiast pomiar wilgotnych materiałów daje zbyt duże „pozorne” wartości współczynnika przewodności cieplnej. Wynika to z przemieszczania się wilgoci w kierunku płyty chłodzącej. Zagadnienie to zostało przebadane przez Krischera (31). Wykazał on, że aby otrzymać rzeczywistą wartość współczynnika przewodności cieplnej, należy wykonać szereg pomiarów, przy różnych temperaturach płyty chłodzącej oraz przy różnych spadkach temperatury. Pomiary te mogą być wykonywane jedynie w warunkach zapobiegających wysychaniu próbki. Wynik otrzymuje się drogą ekstrapolacji. Badania te są, zdaniem Cammerera, tak daleko pracochłonne, że ich przeprowadzenie staje się zazwyczaj niecelowe. Błędy wynikające z pominięcia wpływu wilgotności są znaczne. Zobrazowano je na rys. 16. W związku z tym odpowiednie normy określają dopuszczalną wilgotność próbek, poddawanych pomiarom w aparatach płytowych.

3.1.4. Metoda kuli W. Nusselta (46)

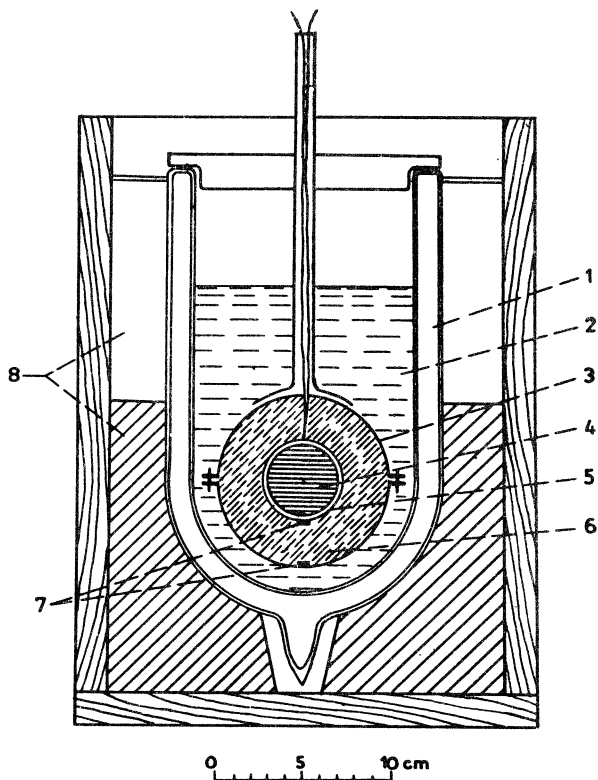
Zaletą metody, przy której badanemu materiałowi nadaje się postać wydrążonej kuli, jest przechodzenie całej ilości ciepła wytworzonego wewnątrz kuli przez warstwę materiału. Metodą tą mogą być badane proszki izolacyjne, materiały ziarniste i włókniaste. Badany materiał umieszczany jest między dwoma kulistymi płaszczami. Wewnątrz mniejszego znajduje się grzałka elektryczna. Średnica zewnętrzna płaszcza wynosi zwykle 20 - 50 cm. Temperatura



Rys. 16. Wyniki pomiarów współczynnika przewodności cieplnej materiałów o różnej wilgotności w aparacie płytowym wg Krischera (31); a - pozorne wartości współczynnika przewodności cieplnej, b - wartości rzeczywiste

tura może być zmieniana od temperatury otoczenia do ok. 1000°C . Zanurzenie kuli w stosownym chłodziwie (woda z lodem, stały dwutlenek węgla, ciekły tlen) pozwala na prowadzenie badań do temperatury -180°C . Na rys. 17 pokazano przykład takiego urządzenia stosowanego w ośrodku badawczym w Monachium (7).

Średnice kul wynoszą odpowiednio 4,5 oraz 10 cm. Według metody Tn.E.Schmidta (9) wewnętrzna kula wypełniona jest parującym czynnikiem chłodniczym. Ilość energii cieplnej przepływającej przez badany materiał oblicza się na podstawie ilości odparowanego czynnika, zmierzonej za pomocą gazomierza. Należy jednak brać pod uwagę pewne zakłócenia np.: przewodzenie ciepła przez przewody zasilające grzałkę, przewody termopar pomiarowych, ułożenie włókien przy materiałach włóknistych itp. Wpływ ułożenia włókien lepiej może być uwzględniony w aparacie płytowym. Przy badaniu materiałów gruboziarnistych o dużych przestrzeniach



Rys. 17. Układ pomiarowy do oznaczania współczynnika przewodności cieplnej materiałów w niskich temperaturach;
 1 - naczynie Dewara (termos), 2 - chłodziwo, 3 - zewnętrzna kulista osłona miedziana, 4 - grzałka elektryczna, 5 - wewnętrzna kulista osłona miedziana, 6 - badany materiał, 7 - punkty pomiaru temperatury, 8 - osłona izolacyjna

międzyziarnowych należy również uwzględnić wpływ grawitacji, w wyniku której w badanej masie pojawiają się prądy konwekcyjne.

W celu ułatwienia napełnienia kuli badanym materiałem, zewnętrzny płaszcz podzielony jest na połowę, a górna część jest dodatkowo zaopatrzona w otwór do napełniania.

Przy zastosowaniu kuli o większej średnicy można jednocześnie oznaczać współczynnik przewodności cieplnej w różnych temperaturach. W tym celu umieszcza się czujniki termopar na różnych głębokościach. Trudność takiego pomiaru polega na dokładnym wyznaczeniu głębokości ustawienia czujników w badanej warstwie.

Według Michiejewa (41) przewodność cieplną można określić stosując metodę kuli, z równania o postaci

$$\lambda = \frac{\dot{Q}\delta}{\pi d_1 d_2 (t_1 - t_2)} = \frac{0,86\delta I \Delta E}{\pi d_1 d_2 (t_1 - t_2)}, \frac{\text{kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}}, \quad (44)$$

gdzie $\dot{Q}$ - ciepło wydzielone przez grzejnik, które przy ustalonej wymianie ciepła w całości przechodzi przez kulistą warstwę materiału do otoczenia, kcal/h,

$$\dot{Q} = 0,86 I \Delta E,$$

δ - grubość ścianki, m,

t_1, t_2 - temperatury na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni próbki, $^\circ\text{C}$,

d_1, d_2 - średnica wewnętrzna i zewnętrzna, m.

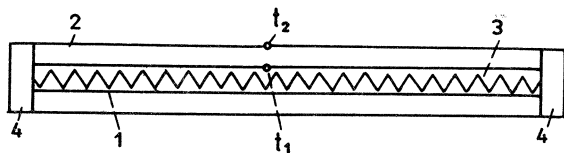
3.1.5. Aparat rurowy van Rinsuma

Schemat aparatu pokazano na rys. 18. Układ pomiarowy składa się z rury stalowej o długości 2 - 3 m. Wewnątrz niej umieszczony jest grzejnik elektryczny. Na rurę z zewnątrz nakłada się warstwę badanego materiału. Przy ustalonym stanie cieplnym, po uwzględnieniu poprawki na straty czołowe, określa się przewodność cieplną z równania o postaci

$$\lambda = \frac{0,86 I \Delta U \ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \pi l (t_1 - t_2)}, \frac{\text{kcal}}{\text{mh}^\circ\text{C}}, \quad (45)$$

$$\dot{Q} = 0,86 I \Delta U$$

gdzie: $\dot{Q}$ - ilość wytworzonej energii cieplnej, kcal/h,
 U - napięcie przyłożone do zacisków grzejnika, V,
 I - natężenie prądu, A,
 t_1, t_2 - temperatury wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni
 badanego materiału,
 d_1, d_2 - średnica wewnętrzna i zewnętrzna badanej próbki
 materiału, m,
 l - długość warstwy badanego materiału.



Rys. 18. Schemat aparatu rurowego; 1 - rura metalowa, 2 - badany materiał, 3 - podgrzewacz elektryczny, 4 - izolacja pierścieni, t_1, t_2 - termoelementy

3.2. Wyznaczanie cieplnych charakterystyk materiałów

W niektórych krajach, np. w RFN, uznawane są urzędowo jedynie wyniki pomiarowe współczynnika przewodności cieplnej wykonane w warunkach ustalonej wymiany ciepła, które zapewniają dobrą dokładność pomiarów w przypadku ciał suchych. Pomiar przy nieustalonym strumieniu cieplnym wykazują jednak wiele zalet przy określaniu cieplnych charakterystyk materiałów wilgotnych. Warunkiem otrzymania poprawnych wyników, przy stosowaniu metod nieustalonej wymiany ciepła, jest jednorodność badanego materiału. Według normy DIN 52 612 ciało jest wtedy jednorodne, gdy w każdym miejscu gęstość w całym rozkładzie masy jest jednakowa czyli wówczas, kiedy pomiar gęstości w dowolnym miejscu badanego ciała daje wynik zgodny z gęstością średnią w granicach błędów

pomiarowych. Metody pomiaru przy nieustalonym strumieniu cieplnym pozwalają na oznaczenie współczynnika przewodności cieplnej materiałów wilgotnych, jeżeli tylko ich struktura jest dostatecznie jednorodna.

3.2.1. Metoda O. Krischera i H. Esdorna (31)

Metoda ta pozwala na pomiar kilku wielkości, a mianowicie współczynnika: wnikania ciepła $\alpha = \sqrt{\lambda cR}$

- przewodności cieplnej λ
- pojemności cieplnej cR
- wyrównywania temperatury $a = \frac{\lambda}{cR}$.

Na rys. 19 pokazano schemat układu pomiarowego.

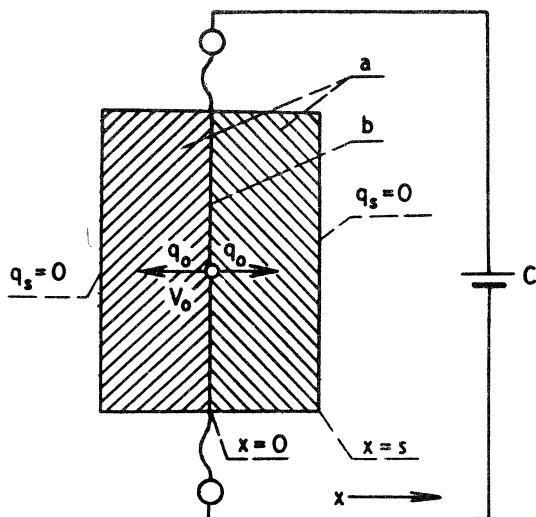
Między dwie płaskie próbki (a) włożona jest folia metalowa (b) o stałej wydajności cieplnej ($2q$). Masa folii jest pomijana. Wartość współczynnika wnikania ciepła oblicza się na podstawie temperatury i czasu w okresie wstępnym, korzystając z równania

$$\alpha = \frac{2q}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{\tau}}{t_0}, \quad (46)$$

gdzie: τ - czas od chwili rozpoczęcia ogrzewania do chwili pojawienia się zmiany temperatury na powierzchni zewnętrznej próbki, czyli w odległości $x = \pm s$ od powierzchni styku z folią,

t_0 - temperatura na powierzchni styku z folią grzejną $x = 0$.

Na podstawie pomiarów z okresu quasi-statycznej (ustalonej) wymiany ciepła, następującego po okresie wstępnym, oblicza się współczynnik przewodności cieplnej, pojemność cieplną oraz współczynnik wyrównywania temperatury. W czasie pomiaru zapobiega się wymianie ciepła między próbką a otoczeniem przez tylną ścianę ($x = a$), której temperatura wynosi t_s . Krzywe temperatur



Rys. 19. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania współczynników wyrównania temperatury (wg Krischera i Esdorna); a - płyt badanego materiału o grubości s , b - grzałka, c - źródło prądu, q_0 - wydajność cieplna grzałki, q_s - strumień cieplny w odległości $x = s$ od grzałki, v_0 - temperatura folii w odległości $x = 0$ w określonej chwili

miejscowych są parabolami 2 stopnia przesuwającymi się proporcjonalnie do czasu. Dla różnicy temperatury $\Delta t = t_0 - t_s$ (niezmiennej w czasie) otrzymuje się w dowolnej chwili τ współczynnik przewodności cieplnej ze wzoru o postaci

$$\lambda = \frac{q s}{2 \Delta t} \quad (47)$$

Pojemność cieplną badanego ciała cR oblicza się w oparciu o gradient temperatury $\Delta t_0 / \Delta \tau$ ze wzoru

$$cR = \frac{q}{\Delta t_0} \cdot s \frac{1}{\Delta \tau} \quad (48)$$

W równaniu tym zamiast Δt_0 można również podstawić Δt_s . Czas $\Delta \tau$ między chwilą pojawienia się dowolnej temperatury na powierzchni $x = 0$ oraz powierzchni $x = s$ pozwala na obliczenie współczynnika wyrównywania temperatury (a) z równania o postaci

$$a = \frac{s^2}{2\Delta\tau} \quad (49)$$

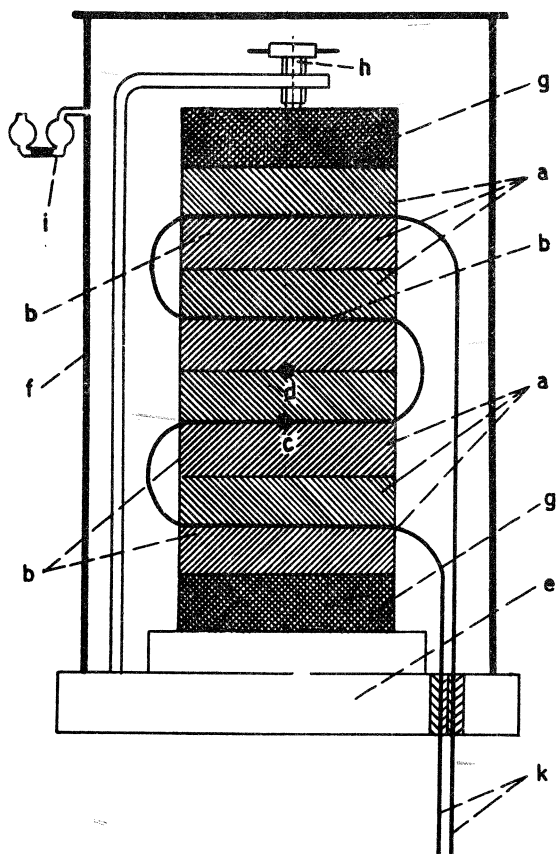
Aby spełnić warunek nieoddawania ciepła przez powierzchnię przeciwną do stykających się z folią grzejną, stosuje się układ pomiarowy przedstawiony na rys. 20.

Miedzy osiem jednakowych próbek włożone są cztery folie grzejne; najwyższa i najniższa próbka osłonięta jest warstwą izolacyjną. Wielkościami pomiarowymi są: wydajność cieplna folii grzejnej i temperatura na styku próbki z folią c oraz dwóch sąsiednich próbek d.

Aby wpływ wymiany ciepła przez boczne powierzchnie próbek oraz powierzchnie izolacji utrzymać w dopuszczalnych granicach, należy odpowiednio dobrać czas pomiaru. Zależy on od grubości próbek oraz ich właściwości. Pomiar powinien być poprzedzony dostatecznie długim okresem (ok. 24 godz.) niezbędnym do całkowitego wyrównania temperatury z otoczeniem. Układ przedstawiony na rys. 20 przewidziany jest dla materiałów wilgotnych. Szczelna obudowa zapobiega odparowaniu wilgoci oraz ogranicza wymianę ciepła z otoczeniem.

3.2.2. Metoda E.F.M. van der Helde

W metodzie tej określenie współczynnika przewodności cieplnej odbywa się poprzez pomiar temperatury w bezpośrednim pobliżu oporu grzejnego, wprowadzonego do badanej próbki. Do pomiaru temperatury używa się termopary. Uproszczony wzór obliczeniowy



Rys. 20. Schemat układu pomiarowego do oznaczania współczynnika przewodności cieplnej (wg Krischera i Esdorna); a - płyta z badanego materiału, b - grzałki (połączone między sobą folią), c, d, - punkty pomiaru temperatury, e - płyta podstawowa, f - pokrywa, g - płyty izolacyjne (brzegowe), h - urządzenie ściskające, i - urządzenie do wyrównywania ciśnienia, k - zasilanie

współczynnika przewodności cieplnej podany przez van der Helda (41), ma postać

$$\lambda = \frac{\dot{q}}{4\pi (t_1 - t_2)} \ln \frac{\tau_2}{\tau_1}, \quad (50)$$

gdzie: $\dot{q}$ - jednostkowa wydajność cieplna oporu grzejnego kcal/(m h),

τ_1, τ_2 - czas dwóch dowolnie dobranych chwil od momentu włączenia prądu, h,

t_1, t_2 - temperatury odpowiadające czasowi τ_1 i τ_2 .

Uprozczone równanie może być stosowane wówczas, jeżeli zostanie spełniony warunek określony następującą nierównością

$$\frac{4a\tau}{r_0^2} > 50, \quad (51)$$

gdzie: a - współczynnik wyrównania temperatury, m^2/h ,

τ - czas od momentu rozpoczęcia badania, h,

r_0 - odległość czujnika termopary od osi oporu grzejnego, m.

Metoda ta może być stosowana tylko w odniesieniu do jednorodnych materiałów oraz wówczas, jeżeli można zapewnić dobre przyleganie materiału do oporu grzejnego. Warunkiem jest uzyskanie stanu równowagi na początku pomiaru oraz równomierna przewodność cieplna w kierunku osiowym i promieniowym.

3.2.3. Metoda Łykowa

Metoda ta pozwala na wyznaczenie współczynnika wyrównywania temperatury (a) na podstawie rozwiązania równania ruchu ciepła dla ciała półograniczonego, przy warunkach brzegowych pierwszego rodzaju (39).

Temperatura półograniczonego ciała na początku jest stała i równa T_0 . W czasie $\tau > 0$ jego powierzchnia przyjmuje temperaturę $T_c \neq T_0$, która pozostaje stała w przeciągu całego okresu trwania procesu wymiany ciepła. Ogólne rozwiązanie równania wymiany ciepła ma postać

$$\Theta = \frac{T(x, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} = \operatorname{erf} \frac{1}{2 \sqrt{Fo_x}}, \quad (52)$$

gdzie: $Fo_x = a\tau/x^2$ - lokalna liczba Fourniera,

$\Theta = \Delta T / (T_0 - T_c)$ - względna zwyżka temperatury w dowolnym punkcie ciała,

x - wymiar liniowy półograniczonego ciała, wzdłuż którego występuje różnica temperatur,

τ - czas odpowiadający różnicy temperatur $\Theta = \Delta T / (T_0 - T_c)$,

$a = \frac{x^2}{\tau} Fo_x$ - współczynnik wyrównywania temperatury.

Wyznaczenie wartości (a) sprowadza się do zapisu zależności

$$\Delta T = T(x, \tau) - T_c = f(\tau) \quad (53)$$

w określonym punkcie x półograniczonego ciała względnej temperatury $\Theta = \Delta T / (T_0 - T_c)$, która w tablicach (39) odpowiada wartości liczby Fo_x .

Stałość temperatury na powierzchni ciała może być zabezpieczona różnymi sposobami, np. poprzez umieszczenie ciała pomiędzy blokami. Przez jeden z nich przepuszcza się ciecz o stałej temperaturze, odmiennej od temperatury środowiska tj. od tej, w jakiej na początku była termostatowana próbka i drugi blok.

Dla płaskiego, izotermicznego źródła ciepła (grzejnicy) zgodnie z wyrażeniem (52) ilość ciepła oddawanego przez grzej-

nicę, a przyjmowanego przez ciało o powierzchni przekroju s w czasie $d\tau$, równa się

$$dQ = -\lambda s \left(\frac{dT}{dx} \right)_0 d\tau = -\lambda s \frac{T_0 - T_c}{\sqrt{\pi a \tau}} d\tau \quad (54)$$

a dla czasu $\tau_2 - \tau_1$

$$Q = \frac{2 s b (T_c - T_0) (\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_1})}{\pi}, \quad (55)$$

gdzie $b = \frac{\lambda}{\sqrt{a}}$ - współczynnik aktywności cieplnej badanego ciała.

Współczynnik aktywności cieplnej (b) można określić z równania (55).

Pabis (48), Gadał i Cybulska (15) wykonali pomiary przewodności cieplnej warstwy ziarna, w zależności od wilgotności, badając zjawisko nieustalanej wymiany ciepła w warstwie. Model geometryczny stanowiska badawczego oraz warunki, przy jakich odbywało się doświadczenie, odpowiadały matematycznemu modelowi wymiany ciepła w pręcie półograniczonym z cieplną izolacją boczną, w którym równanie dyfuzji ma postać

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (56)$$

z następującymi warunkami brzegowymi:

- temperatura początkowa pręta (warstwy) jest stała i równa temperaturze otoczenia

$$t(x, 0) = t_0 = \text{const}; \quad (57)$$

- w dostatecznie dużej odległości od końca (teoretycznie nieskończonej) temperatura pręta (warstwy) jest stała i równa

temperaturze początkowej

$$t(\infty, \tau) = t_0 = \text{const}; \quad (58)$$

- temperatura końca pręta (powierzchni grzałki) spełnia równanie

$$t(0, \tau) = k \sqrt{\tau}. \quad (59)$$

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów próbnych stwierdzono że warunek (57) był spełniony w przypadku, gdy wysokość warstwy była większa od trzech średnic komory. Rozwiązanie równania (56) z tak sformułowanymi warunkami brzegowymi ma postać

$$\frac{t(x, \tau) - t_0}{k \sqrt{\pi \tau}} = i \operatorname{erfc} \frac{1}{2 \sqrt{Fo}}, \quad (60)$$

gdzie liczba Fouriera dla wymiany ciepła

$$Fo = \frac{a \tau}{x^2}. \quad (61)$$

Wykorzystując związek między współczynnikiem wyrównywania temperatury (a) i współczynnikiem przewodności cieplnej λ

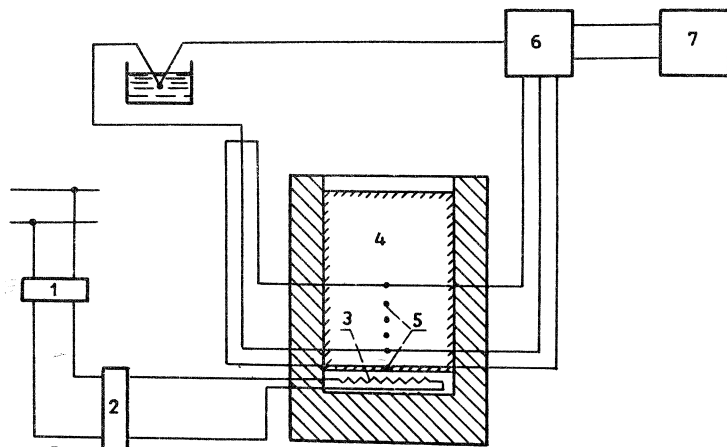
$$a = \frac{\lambda}{c \gamma}, \quad (62)$$

otrzymuje się wyrażenie określające wartość współczynnika przewodności cieplnej

$$\lambda = \frac{c \gamma x^2 Fo}{\tau}. \quad (63)$$

W wyniku pomiarów otrzymuje się wartości temperatur w wybranych punktach x w odstępach czasu τ , a stąd na podstawie zależności (60) wartość liczby Fo .

Schemat stanowiska pomiarowego za Pabisem, Cybalską i Gajdajem (48,15) przedstawiono na rys. 21.



Rys. 21. Schemat stanowiska pomiarowego wg Pabisa, Gadaja i Cybulskiej (15,48); 1 - stabilizator napięcia, 2 - auto-transformator, 3 - grzejnik, 4 - komora pomiarowa, 5 - termopary, 6 - przełącznik, 7 - galwanometr

Do izolowanego cieplnie cylindra (komory pomiarowej) 4, zakończonego z jednej strony płaską grzałką 3, wsypywano z jednokowej wysokości wilgotne ziarno. Za pomocą termopar miedź-konstantan 5, umieszczonych wewnątrz cylindra, sprawdzono rozkład temperatur w pozostałej warstwie. Jeżeli nie było gradientu temperatury, włączono grzałkę, która zasilana prądem stabilizowanym, dawała stały strumień ciepła. Następnie w odstępach 5-minutowych odczytywano rejestrowaną przez galwanometr 7 temperaturę w wybranych punktach warstwy.

Dla uniknięcia termodyfuzyjnego ruchu wilgoci, wywołującego zmianę warunków doświadczenia, należy tak dobrać napięcie zasilające, aby temperatura powierzchni grzałki nie przekraczała podczas pomiarów 80°C . Jest to szczególnie ważne przy wyższych wilgotnościach ziarna.

3.2.4. Metoda Wolkensteina

Porównawcza metoda kompleksowego pomiaru cech termofizycznych przedłożona przez W.S. Wolkensteina opiera się na rozwiązaniu jednowymiarowego równania przewodności cieplnej dla systemu, w których kontaktuje się nieograniczona płyta z półograniczonym ciałem przy warunkach brzegowych pierwszego rodzaju.

System ciał (o początkowej temperaturze $T_0 = \text{const.}$) składa się z nieograniczonej płyty o grubości R (badane ciało - współczynniki λ_1, c_1, γ_1), która znajduje się w idealnym kontakcie cieplnym z półograniczonym ciałem (wzorzec - współczynniki λ_2, c_2, γ_2). Druga powierzchnia nieograniczonej płyty ($x = 0$) ma temperaturę T_c , odmienną od temperatury początkowej T_0 . Metoda ta przewiduje eksperymentalny pomiar temperatury w miejscu kontaktu tych ciał ($x = R$) w zależności od czasu.

Metoda Wolkensteina była stosowana w Polsce do pomiaru cech termofizycznych kłębów ziemniaczanych (4,23,48). Zmodyfikowano przy tym wzory obliczeniowe, pozwalające na określenie współczynnika temperatury (a) oraz współczynnika przewodności ciepła (λ). Schemat stanowiska pomiarowego w którym wykorzystano tę metodę przedstawiono na rys. 22. Jedną końcówkę termopary różnicowej doprowadzono do badanego materiału, mierząc jego temperaturę, drugą natomiast umieszczono z odwrotnej strony plasterka w strumieniu wody o nieco wyższej temperaturze. Różnicę temperatur wskazywał galwanometr.

Na skutek ogrzewania plasterka strumieniem ciepłej wody różnica temperatur malała. Czas potrzebny do wyrównania się temperatur posłużył do obliczenia szukanych współczynników z równań:

$$a = \frac{R^2}{4 p \Delta \tau}, \quad \text{m}^2/\text{h} \cdot 10^{-3} \quad (64)$$

$$\lambda = b \varepsilon \sqrt{a}, \quad \text{kcal}/(\text{mh}^\circ\text{C}) \quad (65)$$

$$c = \frac{\lambda}{a \gamma}, \quad \text{kcal}/(\text{kg}^\circ\text{C}) \quad (66)$$

gdzie: R - grubość plasterka, m,

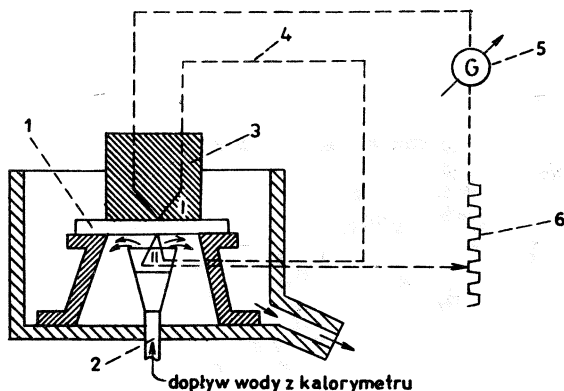
γ - gęstość materiału, kg/m^3 ,

ε, p - parametry bezwymiarowe,

b - wartość stała dla stanowiska pomiarowego,

przy czym

$$b = \frac{c \gamma R}{2 \varepsilon \sqrt{p \Delta \tau}}. \quad (67)$$



Rys. 22. Schemat urządzenia do pomiaru ciepła właściwego, przewodności cieplnej oraz współczynnika wyrównywania temperatury metodą nieustalonej wymiany ciepła w płycie nieograniczonej; 1-próbka o kształcie plasterka, 2-woda o stałej temperaturze, 3-wzorec gipsowy, 4-termopara różnicowa, 5-galwanometr różnicowy, 6-opornica

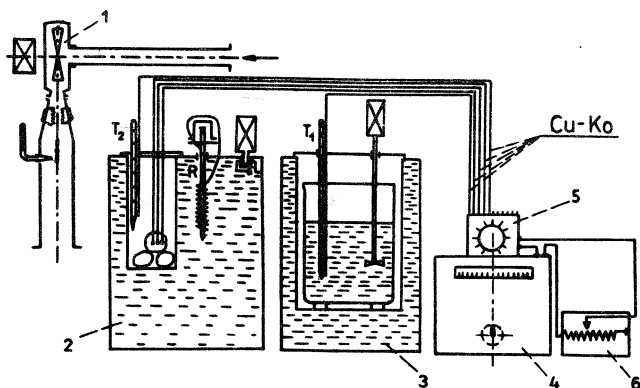
Według Biłowickiej (4) metoda ta nie jest przydatna do oznaczania cech, termofizycznych produktów rolniczych, gdyż błąd względny przy oznaczaniu przewodności cieplnej może wynosić nawet 45%.

Kamiński (23) natomiast stwierdził, że metoda ta ma wiele zalet, a dokładność pomiaru jest dość duża i zależna jest od wycechowania urządzenia (błąd pomiaru do 2%).

3.3. Pomiar ciepła właściwego metodą kalorymetryczną

Kamiński (23) przeprowadził badania nad wyznaczaniem ciepła właściwego ziemniaka metodą kalorymetryczną. Schemat stanowiska pomiarowego pokazano na rys.23. Polega ona na porównaniu ciepła właściwego badanej próbki z ciepłem właściwym wody destylowanej.

Próbkę o znanej masie wstawiono do suszarki, gdzie nagrzewała się ona do 80-90°C. Po nagrzeniu próbka była szybko ważona



Rys. 23. Schemat urządzenia do pomiaru ciepła właściwego metodą kalorymetryczną; 1-suszarka konwekcyjna, 2-ultratermostat, 3 - kalorymetr, 4 - galwanometr ekranowy, 5-przełącznik, 6 - opornica dekadowa

i wstawiana do termostatu 2, wyregulowanego na określoną temperaturę t_3 w zakresie $80-90^{\circ}\text{C}$. Temperatura zasobnika termostatu mierzona była termometrem rtęciowym T_2 , natomiast rozkład temperatur w próbce - przy pomocy trzech termopar umieszczonych na różnych jej głębokościach i galwanometru ekranowego 4. Po wyrównaniu temperatur wewnątrz próbki, co stwierdzono porównując wskazania trzech termopar ze wskazaniem termopary umieszczonej przy bańce termometru rtęciowego (T_2) zasobnika, przenoszono ją szybko do zasobnika kalorymetru wypełnionego wodą destylowaną w ilości 2,4 l. Równomierny rozkład temperatur w wodzie zapewniało mieszadło, a pomiaru wzrostu temperatury dokonywano termometrem rtęciowym T_1 , o zakresie $16-25^{\circ}\text{C}$. Odczytywanie wzrostu temperatury trwało tak długo, dopóki temperatury wskazywane przez termopary umieszczone wewnątrz próbki nie zrównały się z temperaturą wskazywaną przez termoparę umieszczoną w wodzie. Zanotowany przyrost temperatury wody kalorymetrycznej posłużył do określenia ciepła właściwego próbki, zgodnie z następującym bilansem;

$$\text{ciepło oddane przez próbkę: } Q_1 = c M / t_3 - t_2 /, \text{ kcal} \quad (68)$$

$$\text{ciepło pobrane przez wodę: } Q_2 = c_w W / t_2 - t_1 /, \text{ kcal} \quad (69)$$

gdzie: W - masa wody kalorymetrycznej, kg,

M - masa próbki, kg,

t_1 - temperatura początkowa wody, $^{\circ}\text{C}$,

t_2 - temperatura końcowa wody, $^{\circ}\text{C}$,

t_3 - temperatura nagrzania próbki, $^{\circ}\text{C}$,

c_w - ciepło właściwe wody, kcal/kg $^{\circ}\text{C}$,

c - ciepło właściwe próbki, kcal/kg $^{\circ}\text{C}$.

Ponieważ $Q_1 = Q_2$

$$c = \frac{W (t_2 - t_1)}{M (t_3 - t_2)}, \text{ kcal/(kg } ^\circ\text{C)}. \quad (70)$$

Pewną ilość ciepła stracono podczas przenoszenia próbki z termostatu do kalorymetru i w samym kalorymetrze. Urządzenie więc wycechowano, dla znalezienia współczynnika strat kalorymetrycznych. Użyto w tym celu próbkę o znanym cieple właściwym, tj. próbkę żeliwną o masie 0,373 kg ($c_{\text{żel}} = 0,129 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$). Określony w ten sposób współczynnik wyniósł 1,1, stąd ostatecznie

$$c = \frac{W (t_2 - t_1)}{M (t_3 - t_1)} 1,1, \text{ kcal/(kg } ^\circ\text{C)} \quad (71)$$

Opisana wyżej metoda jest prosta. Jej wadą jest jednak to, że ziemniaki należało podgrzać do dość wysokiej temperatury, przy której traciły one część wilgoci. Poza tym zachodził proces kleikowania (zmiana skrobi nierozpuszczalnej w rozpuszczalną), którego wpływ na procesy cieplne nie jest jeszcze dostatecznie zbadany.

4. PODSUMOWANIE

Analizując metody pomiaru przewodności cieplnej, przewodności temperatury oraz współczynnika wyrównania temperatury stwierdzić można, że parametry te są na ogół określane metodami pomiarowymi opartymi na warunkach stanu ustalonego. Z uwagi na to że pomiar w ustalonym stanie cieplnym jest długotrwały i w tym czasie następuje szybka zmiana wilgotności materiału, metody te

są obarczone błędem w przypadku stosowania ich do wilgotnych materiałów rolniczych. Można je stosować do badania cech termofizycznych materiałów izolacyjnych, budowlanych itp. Do pomiaru cech termofizycznych produktów rolniczych bardziej przydatne są metody pozwalające na szybki pomiar w stanie cieplnym nieustalonym.

Metoda pomiaru współczynników termofizycznych w warunkach nieustalonej wymiany ciepła, opracowana przez Wolkensteina, w zasadzie nadaje się do badania materiałów w formie plasterków. Do pomiarów cech termofizycznych materiałów ziarnistych stosowano cylindryczne półograniczoną komorę pomiarową. Jednakże przewodność cieplna komory jest tego samego rzędu, co przewodność cieplna warstwy ziarna w stanie suchym, dlatego też w założeniach do projektu stanowiska pomiarowego przyjęto taki model przepływu ciepła, w którym rola izolacji jest znikoma. Modelem tym jest nieograniczony walec wydrążony.

Analiza wyników badań uzyskanych zarówno w kraju, jak i za granicą, pozwala na stwierdzenie, że wartości podstawowych współczynników termofizycznych wilgotnych ciał organicznych o strukturze kapilarno-porowatej zależą od znacznej liczby czynników, które należy uwzględniać przy opracowywaniu metodyki badań. W dotychczasowych badaniach produktów rolniczych wielkości termofizyczne uzależniano zazwyczaj jedynie od wilgotności, nie określając innych, niezmiernie ważnych czynników, takich jak; forma wiązania wilgoci, rodzaj, wielkość i struktura porowatości, masa objętościowa i struktura uziarnienia, wymiary ziarn oraz temperatura. Brak informacji o porowatości, a także o innych ważkich parametrach badanego ciała, ogranicza korzystanie z badań opisanych w literaturze.

Osobnym zagadnieniem jest wprowadzenie przez badaczy określonych założeń upraszczających, które pozwalają na traktowanie ruchu ciepła w badanym ciele, jako wyłącznie procesu przewodzenia, podczas gdy wymiana ciepła w wilgotnych materiałach o strukturze kapilarno-porowatej odbywa się co najmniej czterema sposobami, tj., poprzez:

- 1) przewodzenie,
- 2) konwekcję,
- 3) promieniowanie,
- 4) dyfuzję pary wodnej wraz ze zmianami fazy, przy udziale ciepła parowania, ewentualnie kondensacji.

W dostępnej literaturze nie znaleziono żadnych danych liczbowych o roli poszczególnych sposobów ruchu ciepła w omawianych ciałach, co by ewentualnie mogło dać podstawę do przyjmowania określonych założeń wstępnych. Problem ten wymaga zatem opracowania, przy czym pełne wyjaśnienie zjawiska ruchu ciepła można osiągnąć jedynie wspólnie z oceną wpływu wymiany wilgoci na wymianę ciepła.

SPIS LITERATURY

1. Adam M., Baclar V., Oktábec Z.: Některé tepelné fyzikální vlastnosti potravin. Priloha časopisu Průmysl potravin. Praha 1964.
2. Bennet C.O., Myers J.E.: Przenoszenie pędu ciepła i masy. Inżynieria chemiczna WNT. W-wa 1967.
3. Berchtold: Heat Measurement Lab. Investigation. Mas.Inst Technol. 1939 r.

4. Biłowska E.: Sprawdzenie na ziemniaku szybkiej metody wyznaczania termofizycznych cech materiału. Biul.Inform.IMER. 7/1971/80/, s. 22-32.
5. Cammerer J.S.: Mitteilungen des Forschungsheims für Wärmeschutz. München H. 4./1924.
6. Cammerer J.S.: Eine neue Prüfwaage für Kieselgurwärmeschutzmassen. Archiv für Wärmewirtschaft H. 10/1936.
7. Cammerer W.M.: Die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Isolierstoffen bei tiefen Temperaturen. Kältetechnik 12. 1970, s. 107-110.
8. Cammerer W.F.: Die Wärmeleitfähigkeit einer geschichteten Aluminium-folien-Mineralfaserisolierung. Wärme 68/1961, s. 8.
9. Cammerer W.M.: Izolacje ciepłochronne w przemyśle. Arkady 1967.
10. Czubik I.A., Masłow A.M.: Sprawocznik po ciepłofizycznych charakterystykach puszczowych produktów. Izd. Puszczewaja Promyszlennost. Moskwa 1970.
11. Derikot L.Z., Niedużij U.A.: Issledowanie ciepłoprowodnosti wołokna iz bazaltowego litia pri małych płotnostiach upakowki. Tiepłofizyka i Tiepłotechnika. Kijew 1964, s. 264.
12. Duszenko W.P.: O Koeficientach tiepłoi massopierienosa włącznych dispersnych materiałów w swiaziz rozlicznem form zwiazi włagi. Tiepłofizyka i Tiepłotechnika. Inst.Techniczeskoj Tiepłofizyki. Kijew 1964, s. 313-316.
13. Finck J.L.: J.Res.Mat.Bur.Stand. Bd 5/1930, s. 243.
14. Finck J.L.: J.Res.Mat.Stand 5/1939, s. 973.
15. Gadaj S.P., Cybulska W.: Przewodność cieplna warstwy ziarna. Roczn.Nauk Roln. S.C., z. 1, s. 7-15.
16. Gogół W.: Pomiary przewodności cieplnej buraka cukrowego i ziemniaka. Roczn.Nauk Roln. Seria C.T. 70, z. 3, s.55-63.

17. Griffith E.: Heat Insulators. Food Investigation Board. Dept Sci. and Ind. Res. Spec. Raport Nr 35, London 1929.
18. Haman J., Szot B., Woźniak W.: Zagadnienia wymiany ciepła i masy w materiałach roślinnych. Problemy Agrofizyki PAN. Ossolineum 1973, z. 9.
19. Held E.F.M.v.d. Hardebol J., Kalshoven J.: Determination of the thermal conductivity of liquids by a nonsteady-state method. Physica 19/1953, s. 208-216.
20. Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki. WNT W-wa 1968.
21. Jegorow G.A., Liubuszkin B.T.: Kukuruza 1960. T.5, nr 3, s.52.
22. Kamiński E.: Wpływ wilgotności na ciepło właściwe niektórych roślin strączkowych. Biul. Inf. IMER, W-wa 1969, nr 10/46.
23. Kamiński E.: Niektóre cechy termofizyczne ziemniaka. Roczniki Nauk Rolniczych s-C, T-69, z. 1, s. 35-52.
24. Kaufmann B.N.: Теплопроводност строительных материалов. M. Stroizdat. 1955.
25. Kazanski W.M.: Zavisimost tieploty isparenia wlagi ot form swiazi jejo s kapilarno-poristym tiełom. Tiepfizyka i tiepłotechnika. Kijów 1964, s. 327-331.
26. Kazanski M.P., Łucyk O.P., Olejnikow W.N.: Wlijanije form swiazi wlagi na niestacionarnyj tiepło i masonierenos w kapilarno poristych tiełach. Moskwa 1963.
27. Kamiński E.: Niektóre cechy termofizyczne ziemniaka. Roczn. Nauk Roln. Seria C T 69, z. 1, s. 35-53.
28. Kącki E.: Termokinetika. WNT Warszawa 1967.
29. Kneule F.: Suszenie, Arkady, Warszawa 1970.
30. Krischer O., Rohnolter H.: Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern. Forsch. Heft 402 VDI Verlag, Berlin 1940.

31. Krischer O., Esdorn H.: Einfaches Kurzzeitverfahren zur gleichzeitigen Bestimmung der Wärmeleitzahl, der Wärmekapazität und der Wärmeeindringzahl fester Stoffe. VDI-Forsch. Heft 450. Düsseldorf 1955.
32. Krischer O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin (Göttingen) Heidelberg 1956, s. 183.
33. Kulandina A.N.: Opriedielenije tiepłofizycznych koeficientow wlaźnych kapilarno-poristych tieł rosczetnym sposobom. Tiepłofizyka i tieplotechnika. Kijów 1964, s. 332.
34. Lisowienko A.: Piszczew. Promyszl. Nr 4, s. 165-170, 1966.
35. Łykov A.W.: Teoria suszki. Moskwa, Gosenergoizdat. 1950.
36. Łykov A.W.: Jawlenija pierenosa w kapilarno-poristych tiełach. M. Gostechizdat. 1954.
37. Łykov A.W.: Teoria tiepłoprowodnosti. Gosizdat. Moskwa 1962.
38. Łykov A.W.: Tiepło i massoobmien w kapilarno-poristych tiełach. Problemy tiepłoozmiena. Atomizdat. Moskwa 1967.
39. Łykov A.W. i in.: Metody opriedielenija tiepłoprowodnosti i temperaturoprowodnosti. Moskwa 1973, s. 63.
40. Madejski J.: Teoria wymiany ciepła. PWN, Warszawa-Poznań, 1973, s. 7.
41. Michiejew M.: Zasady wymiany ciepła. PWN 1953.
42. Moraczewski I., Angenickaja R.S.: Nowyje pribory i metodyka dla izuczenija mechanizma suszki kołloidnych i kapilarno-poristych materiałow. Moskwa 1963.
43. Nikitina L.M.: K woprosu o gigrostatikie i massopierenosie w sistemie tieł. Obszczyje woprosy tiepło i massobzmiena. Mińsk 1966, s. 55-59.
44. Nikitina L.M.: Termodynamiczeskije parametry i koeficjenty massopierienosa wo wlaźnych materiałach. Energia. Moskwa 1968.

45. Nikitina J.M.: Termodinamiczeskije parametry i koeficienty masopierenosa wo wlażnych materialach. Energia.Moskwa 1968.
46. Nusselt W.: Wärmeleitfähigkeit von Wärme-Isolierstoffen. Forsch. Arb.Ing.-Wes. H, 63-64/1909.
47. Pabis S.: Suszenie płodów rolnych. PWRiL W-wa 1965.
48. Pabis S.: Wyznaczanie przewodności cieplnej w warstwie ziarnistych produktów rolniczych. Biul.Prac.Nauk.Bad. nr 5, 1967.
49. Pabis S., Gadał S.: Przewodność cieplna warstwy ziarna in a sion. Biul.Inf. IMER nr 12, 1970, s. 27-33.
50. Pabis S.: Fizyczne cechy surowca przeznaczonego do sztucznego suszenia. Zesz.Probl.Post.Nauk Roln. nr 12, 1971.
51. Poensgen R.: Ein technisches Verfahren zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit plattenformiger Stoffe. Z.VDI 56/1912.
52. Pticyń S.D.: Ziarnosusziki. Moskwa 1962.
53. Raich E.: Das Forschungsheim für Wärmeschutz e.V., München, in zwanzigjähriger Tätigkeit. Wärme-und Kältetechnik 41 1939, s. 1-6.
54. Rebinder P.A.: O formach zwiazi włagi s materialami w procese suszki.
55. Roskacz M.P.: Niekatoryje swojstwa trawy i trawianoj muki. Sbornik naucznych rabot aspirantow. Mińsk 1967.
56. Samoczetow W.F., Dżorogian G.A.: Ziarnosuszenie. Kołos. Moskwa 1964, s. 13.
57. Slaviček E., Handa K., Kmínek M.: Listy cukr. 78 nr 3 s. 116-118, 1962.
58. Wszeleskij A.N., Gromow A.M.: Konserw. owoszczesusz.prom. 12, 1963.
59. Żaden W.Z., Cheleński M.Z.: Sach.prom. 37, nr 3, s. 54-56 1963.

SPIS TREŚCI

str.

1.	WPROWADZENIE	5
2.	WPŁYW RÓŻNORODNYCH CZYNNIKÓW NA WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNE CIAŁ	8
2.1.	Wymiana ciepła w materiałach suchych	9
2.2.	Przewodność cieplna materiałów wilgotnych . .	14
2.3.	Właściwości cieplne materiałów w zależności od form wiązania wilgoci	33
3.	METODY POMIARU WSPÓŁCZYNNIKÓW PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ, PRZEWODNOŚCI TEMPERATURY I CIEPŁA WŁAŚCIWEGO	40
3.1.	Pomiary wielkości cieplnych w warunkach ustalonego stanu cieplnego	41
3.1.1.	Aparat dwupłytowy Poensgena	41
3.1.2.	Aparat jednopłytowy (7,9)	46
3.1.3.	Zminiaturyzowany aparat płytowy	48
3.1.4.	Metoda kuli W. Nusselta	50
3.1.5.	Aparat rurowy van Rinsuma	53
3.2.	Wyznaczanie cieplnych charakterystyk mate- riałów	54
3.2.1.	Metoda O. Krischera i H. Esdorna	55
3.2.2.	Metoda E.F.M. van der Helda	57
3.2.3.	Metoda Łykowa	59
3.2.4.	Metoda Wolkensteina	64
3.3.	Pomiar ciepła właściwego metodą kaloryme- tryczną	66
4.	PODSUMOWANIE	68
5.	SPIS LITERATURY	70

Dotychczas ukazały się następujące numery

PROBLEMY AGROFIZYKI

1. Jan Gliński, Witold Stępniewski - Zastosowanie chromatografii gazowej w badaniach gleboznawczych.
2. Piotr Kowalik - Podstawy teoretyczne pomiarów potencjału wody glebowej.
3. Jan Gliński, Jerzy Duliban - Potencjał oksydoredukcyjny w glebach.
4. Małgorzata Dąbek-Szreniawska - Mikrobiologiczne aspekty tworzenia się agregatów glebowych.
5. Bogusław Szot - Rozwój badań właściwości fizycznych materiałów rolniczych.
6. Ignacy Dechnik, Janusz Stawiński - Powierzchnia właściwa w badaniach fizykochemicznych i fizycznych właściwości gleb.
7. Adam Pukos, Ryszard Walczak - Podstawy teoretyczne badania właściwości mechanicznych gleb.
8. Bogusław Szot, Grażyna Kolemba - Metody oceny wylegania zbóż.
9. Janusz Haman, Bogusław Szot, Wanda Woźniak - Zagadnienie wymiany ciepła i masy w materiałach roślinnych.
10. Materiały seminarium poświęconego fizyce wody glebowej. Praca zbiorowa.
11. Henryk Czachor, Ryszard Walczak - Zamknięte źródła radioizotopowe w badaniach fizycznych właściwości gleb.
12. Zastosowanie analizy spektralnej w badaniach rolniczych. Praca zbiorowa.
13. Krystyna Konstankiewicz, Adam Pukos, Ryszard Walczak - Domenowa teoria histerezy dla termodynamicznych procesów w glebie.

14. Jerzy Szczypa, Zofia Sokołowska - Zastosowanie radioizotopów do badania fizykochemicznych właściwości gleb.
15. Janusz Haman, Adam Pukos - Aktualne zagadnienia mechaniki gleb.
16. Jan Gliński, Zofia Stępniewska - Zastosowanie elektrod selektywnych w badaniach gleboznawczych.
17. Ignacy Dechnik, Jerzy Lipiec - Zwięźłość gleby jako czynnik środowiska rozwoju roślin.
18. Ignacy Dechnik, Stanisław Tarkiewicz - Zmiany właściwości agrofizycznych gleb pod wpływem działania narzędzi aktywnych.
19. Ryszard Walczak, Barbara Witkowska - Metody badania i sposobu opisywania agregacji gleby.
20. Władysław Byszewski, Janusz Pala - Niektóre aspekty związku między poziomem mechanizacji produkcji roślinnej a właściwościami fizycznymi roślin.
21. Ignacy Dechnik, Ryszard Dębicki - Czynniki zaskorupiania gleb oraz metody przeciwdziałania temu zjawisku.

Problemy Agrofizyki można nabyć w Księgarni ORPAN -
Pałac Kultury i Nauki, 00-901 Warszawa.

