

# problemy agrofizyki

POLSKA AKADEMIA NAUK · ZAKŁAD AGROFIZYKI



Ossolineum

zeszyt 9

rok 1973

**ZAGADNIENIA WYMIANY  
CIEPŁA I MASY W MATERIAŁACH ROŚLINNYCH**

Wydawnictwo Naukowe PWN  
Warszawa 1984  
100 str. 10 zł

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

## PROBLEMY AGROFIZYKI

9

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

# PROBLEMY AGROFIZYKI

9

JANUSZ HAMAN, BOGUSŁAW SZOT, WANDA WOŹNIAK

## ZAGADNIENIA WYMIANY CIEPŁA I MASY W MATERIAŁACH ROŚLINNYCH

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

1973

Komitet Redakcyjny:  
BOGDAN DOBRZAŃSKI (przewodniczący)  
JAN GLIŃSKI, BOGUSŁAW SZOT

Okładkę projektował: ZYGMUNT ZIEMKA  
Redaktor Wydawnictwa: AURELIA PODGÓRSKA

*Wszelkie prawa zastrzeżone. Printed in Poland*

Zakład Narodowy im. Ossolińskich — Wydawnictwo. Wrocław 1974.  
Nakład: 500 egz. Objętość: ark. wyd. 1,70, ark. druk. 2,75. Papier  
offset. kl. III, 70 g, 61 × 86. Oddano do druku 14 XII 1973. Druk  
ukończono w styczniu 1974. Wrocławska Drukarnia Naukowa. —  
Zam. 1859/73 — N-11. Cena zł 10.—

## WPROWADZENIE

Procesy zachodzące podczas suszenia materiałów roślinnych, dotyczące głównie wymiany ciepła i masy, należą do zagadnień skomplikowanych, wieloczynnikowych i niejednokrotnie trudnych do uchwycenia, pomimo rozwoju współczesnej techniki. Dlatego też stopień znajomości przebiegu tych procesów oraz sposoby odpowiedniego zaprogramowania ich są jak dotychczas niewielkie, aczkolwiek nie ulega wątpliwości, że mają one bardzo duże znaczenie praktyczne dla suszarnictwa i przechowalnictwa.

Zasadniczym celem suszenia płodów rolnych jest zahamowanie procesów biochemicznych występujących po zbiorze oraz uniemożliwienie lub zmniejszenie rozwoju szkodliwych drobnoustrojów i pleśni. Niektóre płody również w czasie magazynowania wykazują siły witalne, zaznaczające się przede wszystkim oddychaniem, którego intensywność zależy od temperatury, wilgotności materiału oraz struktury i jakości jego masy /20/. Higroskopijność płodów rolnych stwarza również niebezpieczeństwo powstania dogodnych warunków dla niekorzystnych procesów. Wilgotność materiałów roślinnych determinuje zarówno woda występująca powierzchniowo, w kapilarach, jak i w komórkach /17/. Ustalenie granicy między poszczególnymi formami wiązania wody nie jest sprawą prostą, gdyż występuje tu układ pozostający w ciągłym ruchu i w stałym dążeniu do równowagi z otoczeniem i procesami wewnętrznymi. Złożoność problemu odpowiedniej konserwacji płodów rolnych polega przede wszystkim na różnorodnym powiązaniu wielu czynników decydujących o prawidłowym lub nieprawidłowym przygotowaniu materiałów do przechowywania i podczas magazynowania. Wpływ warunków zewnętrznych oraz niepełna znajomość procesów wewnętrznych przy zróżnicowanych warunkach, powodują niejednokrotnie poważne straty materialne.

Z dostępnej literatury fachowej można by wywnioskować, że znajomość pewnych czynników i parametrów termofizycznych oraz ich zmian w ujęciu dynamicznym może wyjaśnić wiele zagadnień związanych z podstawowym procesem, jakim jest wymiana ciepła i masy w materiałach roślinnych. Do nich zaliczono:

- wilgotność materiału,
- intensywność parowania wilgoci,
- powierzchnia parowania,
- histereza wilgoci,
- gęstość strumienia wilgoci,
- gradient koncentracji wilgoci,
- współczynnik dyfuzji wilgoci,
- współczynnik przejmowania wilgoci,
- gradient temperatury,
- współczynnik przejmowania ciepła,
- temperatura powierzchni materiału,
- temperatura wilgotnego materiału.
- współczynnik termogradientny,
- przewodność cieplna materiału,
- współczynnik dyfuzji cieplnej,
- ciepło parowania,
- masa suchego materiału,
- ciepło właściwe suchej masy,
- ciepło właściwe wilgotnej masy,
- izotermy sorpcji,
- objętość ciała,
- gęstość usypna,
- porowatość warstwy materiału.

#### WYMIANA CIEPŁA I WILGOCI W PROCESIE SUSZENIA

Proces cieplnego suszenia wilgotnych płodów rolnych obejmuje: przemieszczenie wilgoci związanej w materiale, przekształcenie jej w stan pary, pochłonięcie przez otaczający (zewnątrzny) ośrodek i odnrowadzenie od obiektu suszenia. Przy najbardziej rozpowszechnionym konwekcyjnym sposobie suszenia

czynnik suszący oddaje wilgotnemu materiałowi ciepło konieczne do wyparowania wilgoci i pochłania wyparowaną z niego wodę, co oznacza że między wilgotnym materiałem a czynnikiem zachodzi proces wymiany ciepła i masy, połączony z przemianą fazową.

Podczas suszenia konwekcyjnego materiałów kapilarno-porowatych (ziarna) zachodzi jednocześnie wiele wzajemnie związanych zjawisk, do których należą:

- przekazywanie ciepła od nagrzanego czynnika ku powierzchni wilgotnego materiału (przejmowanie ciepła),
- rozchodzenie się ciepła od powierzchni materiału ku jej warstwom wewnętrznym (przewodzenia ciepła),
- przemieszczanie wilgoci wewnątrz materiału od centrum do powierzchni (przewodzenie wilgoci),
- parowanie wilgoci,
- dyfuzja pary z powierzchni materiału do otaczającego ośrodka gazowego.

W technice suszarniczej rozwinięte są także sposoby suszenia, w których w istotny sposób na wymianę ciepła i masy wpływa promieniowanie.

Suszenie jest procesem niestacjonarnym, tzn. że zarówno temperatura suszonego ciała, jak i zawartość wody ulegają ciąglej zmianie w czasie. Zachodzą więc zjawiska zewnętrznej wymiany ciepła i masy między powierzchnią suszonego materiału i ośrodkami zewnętrznymi oraz zjawiska wewnętrznej wymiany ciepła i wilgoci - wewnątrz materiału.

Proces suszenia materiału można scharakteryzować następującymi wielkościami wektorowymi /16/:

- gradientem koncentracji wilgoci ( $\nabla u$ )
- gradientem temperatury ( $\nabla T$ )
- gęstością strumienia wilgoci ( $i$ ).

Pod gradientem koncentracji wilgoci rozumie się wielkość wektorową równą liczbowo przyrostowi zawartości wilgoci na jednostkę długości normalnej i skierowaną wzdłuż normalnej w stronę większej koncentracji wilgoci. Gradient temperatury to wektor liczbowo równy zmianie temperatury na jednostkę długości normalnej skierowany wzdłuż normalnej w stronę wzrostu temperatury. Gęstość strumienia wilgoci ( $i$ ) jest wektorem

skierowanym w stronę przeciwną do gradientu koncentracji wilgoci (w przypadku przewodności wilgoci) lub gradientu temperatury (w przypadku przewodności ciepła i masy) i równym liczbowo ilości wilgoci przenoszonej w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię izopotencjalną.

Podstawowe prawo wewnętrznego przenoszenia wilgoci /16, 22, 23, 28/ przedstawia się następująco:

$$i = i_u + i_T = - a_m \gamma_o (\nabla u + \nabla T \delta), \quad (1)$$

gdzie

- $i$  - ogólna gęstość strumienia wilgoci,
- $i_u$  - gęstość strumienia wilgoci spowodowana działaniem gradientu wilgoci,
- $i_T$  - gęstość strumienia wilgoci spowodowana działaniem gradientu temperatury,
- $a_m$  - współczynnik dyfuzji wilgoci w materiale,
- $\delta$  - współczynnik termogradientny materiału wskazujący, jaki gradient koncentracji wilgoci tworzy się w ciele przy gradiencie temperatury,
- $\gamma_o$  - gęstość absolutna suchego materiału.

Jeśli  $\nabla u$  i  $\nabla T$  skierowane są przeciwnie, co ma miejsce przy wilgotności wewnętrznych warstw materiału większych od zewnętrznych, a temperaturze zewnętrznych warstw wyższej od wewnętrznych, to kierunek ogólnego strumienia wilgoci będzie określany tym gradientem, który tworzy bardziej intensywny strumień wilgoci. Kierunek strumienia wilgoci częściej określa  $\nabla u$ , a  $\nabla T$  tworzy tylko opór dopełniający przemieszczenia wilgoci wewnątrz materiału od wilgotniejszych warstw ku mniej wilgotnym. Takie zjawisko występuje np. przy konwekcyjnym suszeniu.

Przy suszeniu promieniami podczerwonymi wektory  $\nabla u$  i  $\nabla T$  skierowane są również przeciwnie, ale sam proces przebiega inaczej /16, 28/. Wskutek szybkiego i intensywnego nagrzania powierzchni materiału, przewodzenie wilgoci spowodowane gradientem temperatury jest bardziej intensywne od przewodzenia wilgoci pod wpływem gradientu koncentracji. Wilgoć przemiesz-

cza się więc w kierunku strumienia ciepła, tzn. od powierzchni ciała do centrum, powodując wzrost koncentracji wilgoci w wewnętrznych warstwach suszonego materiału. Wówczas zewnętrzna wymiana wilgoci może zostać zahamowana, a w wyniku tego zjawiska nie będzie zachodziło suszenie materiału. Badania doświadczalne potwierdzają taki przypadek /3, 18/. Przy suszeniu elektrycznym strumień ciepła skierowany jest od wewnętrznych warstw materiału ku powierzchni. Zatem gradient temperatury i gradient koncentracji wilgoci skierowane są w tę samą stronę, co w końcowym efekcie prowadzi do zwiększenia szybkości suszenia. Zgodność kierunków rozważanych gradientów osiąga się także przez stosowanie kombinowanych sposobów suszenia /16/.

Woda przemieszczająca się z warstw wewnętrznych materiału ku jego powierzchni zostaje usunięta drogą parowania, przy czym parowanie wilgoci z powierzchni materiału jest podobne do parowania ze swobodnej powierzchni cieczy, tj.:

$$m = \alpha_m (P_M - p_p) \frac{p_o}{p}, \quad (2)$$

gdzie

- $m$  - intensywność parowania wilgoci,
- $\alpha_m$  - współczynnik wymiany wilgoci między powierzchnią parującą a otoczeniem, zależny głównie od prędkości i kierunku przepływu powietrza (współczynnik przejmowania masy),
- $P_M$  - ciśnienie cząstkowe pary wodnej na powierzchni ciała,
- $p_p$  - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w otaczającym powietrzu,
- $p_o$  - normalne ciśnienie atmosferyczne ( $1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ),
- $p$  - ciśnienie barometryczne.

Z analizy równania wynika, że parowanie wilgoci zachodzi tylko przy warunkach  $p_M > p_p$ , przy czym im większa jest różnica  $p_M - p_p$ , tym intensywniej przebiega suszenie /16, 17, 28/.

Przy suszeniu konwekcyjnym gradient temperatury jest niewielki i przemieszczenie wilgoci wewnątrz materiału zachodzi na skutek przewodności wilgoci /16/, co na podstawie prawa zachowania masy można zapisać:

$$- a_m \gamma_o (\nabla u)_p F = \alpha_m (P_M - p_p) \frac{p_o}{p} F = \frac{dM}{d\tau} \quad (3)$$

lub

$$\begin{aligned} \frac{du}{d\tau} &= \frac{dM}{d\tau} \cdot \frac{100}{G_c} = - a_m \gamma_o (\nabla u)_p \frac{100F}{G_c} = \\ &= \alpha_m (P_M - p_p) \frac{P_o}{p} \cdot \frac{100F}{G_c}, \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie

- $F$  - powierzchnia parowania,  
 $G_c$  - masa suchego ciała,  
 $(\nabla u)_p$  - gradient koncentracji wilgoci na powierzchni materiału.

Równanie (4) wyraża ogólnie zależność prędkości suszenia od prędkości przemieszczenia wilgoci do powierzchni materiału i prędkości dyfuzji pary przez tzw. warstwę graniczną, pod którą rozumie się przylegającą do materiału warstewkę gazu. Parametry tej warstwy różnią się od parametrów otaczającego ośrodka.

Ilość ciepła pobieranego przez obiekt suszenia od otaczającego powietrza w jednostce czasu określa wyrażenie:

$$Q = \int_{(F)} \alpha (T_B - T_M) dF = F \alpha (T_B - T_M)_{\text{śr}}, \quad (5)$$

gdzie

- $\alpha$  - współczynnik wymiany ciepła (przejmowania ciepła),  
 $T_B$  - temperatura powietrza,  
 $T_M$  - temperatura powierzchni materiału.

Indeks „śr” wskazuje, że przy całkowaniu wyrażenie  $(T_B - T_M)$  przyjęto za stałe i wzięto średnią jego wartość po powierzchni ciała. Prędkość przekazywania ciepła  $Q$  od jego nośnika do materiału zależy od współczynnika wymiany ciepła  $\alpha$  i od powierzchni kontaktu cząsteczek materiału z nośnikiem oraz różnicy temperatur nośnika i materiału. Wielkość współczynnika

wymiany ciepła  $\alpha$  zależy od właściwości materiału i warunków opływania jego cząstek przez nośnik ciepła. Warunki opływania polepszają się przy zmniejszeniu rozmiarów cząstek materiału i powiększeniu prędkości czynnika /12, 16, 19, 33, 35/.

Ciepło pobrane przez wilgotny materiał jest zużyte na podwyższenie jego temperatury i na wyparowanie wilgoci /16/:

$$Q = r \frac{dM}{d\tau} + \int_{(v)} c \gamma \frac{dT}{d\tau} dV = r \frac{dM}{d\tau} + c \gamma V \frac{dT_{\text{śr}}}{d\tau}, \quad (6)$$

gdzie

- $c$  - ciepło właściwe wilgotnego ciała,
- $\gamma$  - gęstość wilgotnego ciała,
- $T$  - temperatura wilgotnego ciała,
- $T_{\text{śr}}$  - średnia temperatura ciała,
- $r$  - ciepło desorpcji (przyjęto za równe ciepłu parowania),
- $V$  - objętość ciała.

( $c$ ,  $\gamma$  i  $T$  przyjęto przy całkowaniu za stałe).

Podstawowe równanie wymiany ciepła i masy w procesie suszenia

$$r \frac{du}{d\tau} \cdot \frac{1}{100} + (c_o + \frac{W}{100}) \frac{dT_{\text{śr}}}{d\tau} = \frac{F\alpha}{G_c} (T_B - T_M)_{\text{śr}}, \quad (7)$$

gdzie

$c_o$  - ciepło właściwe suchego materiału

wiąże w jedną zależność prędkość suszenia  $\frac{du}{d\tau}$ , prędkość nagrzewania materiału  $\frac{dT_{\text{śr}}}{d\tau}$  i temperaturę powierzchni ciała  $T_M$ . Prędkość suszenia zależy nie tylko od intensywności doprowadzenia ciepła (wymiany ciepła), ale także od intensywności odprowadzenia wilgoci (wymiana masy). Wymiana ciepła i masy odbywa się zatem jednocześnie i przy tym samym czynniku suszącym, a zwiększenie intensywności wymiany ciepła zachodzi równocześnie ze wzrostem intensywności wymiany masy. Współczynniki wymiany ciepła  $\alpha$  i masy  $\alpha_m$ , zależne od warunków opływania materiału przez nośnik ciepła i powierzchni kontaktu materiału z czynnikiem, wchodzą w analogiczne równania

wymiany ciepła (5) i masy (2) oraz wskazują na podobny ich wpływ na intensywność tych procesów.

Równania (1), (4) i (7) opisują podstawowe zjawiska zachodzące w procesie suszenia wilgotnych materiałów. Pozwalają one przeanalizować i ocenić wpływ niektórych czynników na proces suszenia.

## HISTEREZA WILGOCI, JEJ WYSTĘPOWANIE I MECHANIZM TWORZENIA

Higroskopijność jest cechą charakterystyczną materiałów hydrofilowych o budowie kapilarnej przy małym przekroju kapilar. Ciała higroskopijne pochłaniają parę aż do osiągnięcia określonego stanu równowagi, a zjawisko takie zwane jest adsorpcją. Zjawisko przeciwne to desorpcja. Związek między wartością wilgoci w materiale i odpowiadającym jej ciśnieniem cząstkowym pary w otoczeniu (wyrażonym wilgotnością powietrza) przy określonej temperaturze nosi nazwę izotermy sorpcji. Izotermy te mają różny przebieg w zależności od tego, czy wyznaczone są przy wzroście, czy przy spadku wilgotności. Istnieje więc możliwość wyznaczenia histerezy między wilgotnością a ciśnieniem pary wodnej.

Houston /13/ badając próbki ryżu o poziomie wilgotności 14,8% przez cykl sorpcja - desorpcja otrzymał histerezę o odchyleniu wilgotności 1%. Chung i in. /6/ używali pszenicy do badania efektu histerezy. Eksperyment rozpoczęto dla pszenicy o wilgotności 26% i przeprowadzono ją przez trzy cykle sorpcji. Maksymalne odchylenie krzywych sorpcji i desorpcji dla dwu pierwszych cykli wynosiło w przybliżeniu 2%. Dla trzeciego cyklu nie zaobserwowano odchylen między adsorpcją i desorpcją w porównaniu z dwoma pierwszymi. Young i in. /37/ obserwowali jeden cykl histerezy, używając roztworów soli do kontroli wilgotności w badanym układzie. Między desorpcją od pełnego nasycenia a adsorpcją od pełnego wysuszenia zaobserwowano różnicę równą w przybliżeniu 5%.

Hart /10/ badał pszenicę ozimą o wilgotności od 11,6% do

12,4%, stosując barwienie części nasion w próbkach nawilżanych i suszonych. W temperaturze 42°C i 24°C zaobserwował efekt histerezy rzędu 0,76% wilgotności, a w temperaturze 50°C rzędu 0,37%, przy czym wilgotność desorpcji była większa od adsorpcji. Powtarzanie cyklu prowadziło tylko do nieznacznego zmniejszenia efektu histerezy.

Henderson /11/ oznaczał histerezę na próbkach ryżu o wilgotności 21,3% w stosunku do suchej masy. Badana próbka umieszczona w pojemniku z metalowym dnem suszona była powietrzem o temperaturze pokojowej, dopóki waga ryżu nie osiągnęła uprzednio zaprogramowanej wartości. Następnie wilgotność próbki zwiększono aż do osiągnięcia równowagi przy wilgotności względnej 85%. Próbkę przeprowadzono przez dwa i pół cykła. Stwierdzono istnienie małej histerezy o różnicy wilgotności mniejszej od 1%. Efekt histerezy malał ponadto, gdy materiał przechodził przez kolejne cykle sorpcja - desorpcja.

Wielu autorów rozważało mechanizm wyjaśniający zjawisko histerezy. McBain /24/ i Zsigmondy /38/ podają równanie Thomsona, które może opisać zjawisko histerezy:

$$\ln \frac{p}{p_s} = 2\sigma V / rRT,$$

gdzie

- p - ciśnienie pary dla wklęsłej powierzchni cieczy,
- p<sub>s</sub> - ciśnienie pary nasyconej dla T,
- σ - napięcie powierzchniowe,
- V - objętość 1 mola cieczy,
- r - promień kapilary,
- R - stała gazowa,
- T - temperatura.

Podczas procesu desorpcji ścianki kapilar są wilgotne i dlatego meniski mają mniejszy promień krzywizny niż w przypadku, gdy ścianki kapilar są suche. W okresie pochłaniania wilgoci (sorpcji) następuje częściowe zwilżenie ścianek, a w wyniku tego tworzy się menisk o większym promieniu krzywizny, mimo równych wymiarów kapilar. Ze wzoru Thomsona wynika, że ciśnienie nasycenia pary zależy od promienia krzywizny me-

nisku, a więc jest ono mniejsze podczas desorpcji niż podczas adsorpcji przy równych poziomach wilgotności materiału.

Effekt histerezy tłumaczy się też tym, że zanieczyszczenia gazowe, a szczególnie powietrze adsorbowane w porach lub na ściankach kapilar, ograniczają pochłanianie wody /11/. Gdy zwiększa się ciśnienie pary wodnej i więcej wody wypełnia przestrzeń kapilarną, co ma miejsce w trakcie adsorpcji, to obce materiały są usuwane. W czasie desorpcji materiały obce nie występują, a więc wynikająca zależność między ciśnieniem pary wodnej a wilgotnością jest inna i dlatego powstaje histereza.

Dynamika wilgoci uzależniona jest zatem od wielu czynników i szczególnie istotne znaczenie ma w procesie suszenia różnych produktów rolnych. Wydaje się więc, że cennym wskaźnikiem wymiany ciepła i masy może być histereza wilgoci, której nie należy pomijać przy badaniach ważnych dla suszarnictwa i przechowalnictwa materiałów roślinnych.

#### WPLYW PARAMETRÓW WEWNĘTRZNYCH NA NIEKTÓRE CECHY FIZYCZNE SUSZONYCH PŁODÓW ROLNYCH

Mohsenin /26/ zaznacza, że dla dokładnego zrozumienia mechanizmu wymiany ciepła i masy w procesie suszenia muszą być znane pewne właściwości termiczne badanych materiałów, gdyż w przeciwnym przypadku całe zagadnienie będzie się sprowadzać do założeń empirycznych. Do takich cech należą między innymi: ciepło właściwe, przewodność cieplna, współczynnik dyfuzji cieplnej, współczynnik dyfuzji wody, ciepło parowania, ciężar usypny.

Technikę suszarniczą - w odniesieniu do niektórych cech fizycznych produktów rolnych - interesują zależności między wartościami danych właściwości a parametrami wewnętrznymi materiału (zawartość wody, temperatura, gęstość itd.).

Ciepło właściwe wilgotnego ciała stałego „c” równe jest liczbowo sumie ciepła właściwego jego suchej masy „c<sub>s</sub>” i zawartości wody danego materiału „u”:

$$c = c_s + u.$$

Dla płodów rolnych równanie to jest słuszne dla  $u \geq 6-8\%$  /28/. Wartość ciepła właściwego suchej masy jest niezbędną przy określaniu innych cech termofizycznych.

Gadaj /8/ określa wartość ciepła właściwego suchej masy (pszenicy, jęczmienia i plasterków ziemniaków przemysłowych) z bilansu cieplnego, dokonując pomiarów za pomocą kalorymetru. Próbkę ziarna lub plasterka ziemniaka umieszczano w woreczku z gazy i nagrzewano w ultratermostacie do temperatury około  $90^{\circ}\text{C}$ . Po wyrównaniu temperatur w całej objętości próbki umieszczano ją w naczyniu kalorymetru, w którym znajdowała się dokładnie wymieszana woda destylowana. Po tym zabiegu włączano mieszadło i odczytywano temperaturę wody co 30 sek., aż do momentu, gdy wartość następnego odczytu była niższa od poprzedniego. Dla jęczmienia i pszenicy nie zaobserwowano przyrostu temperatury spowodowanego pochłanianiem wody (pęcznieniem), natomiast dla ziemniaków przyrost był wyraźny. Na podstawie wzorów

$$c_p = \frac{m_w c_w (t_3 - t_1) - m_0 c_0 (t_2 - t_3)}{m_p (t_2 - t_3)}$$

1

$$c'_p = c_p \cdot \varphi \dots$$

gdzie

- $m_p$  - masa próbki,
- $c_p$  - ciepło właściwe próbki,
- $m_0$  - masa pojemnika (woreczek z gazy),
- $c_0$  - ciepło właściwe pojemnika,
- $m_w$  - masa wody,
- $c_w$  - ciepło właściwe wody,
- $t_1$  - temperatura początkowa wody w kalorymetrze,
- $t_2$  - temperatura początkowa próbki,
- $t_3$  - temperatura końcowa wody,
- $\varphi$  - stała kalorymetru,
- $c'_p$  - mierzone ciepło właściwe,

obliczono wartości ciepła właściwego suchej masy badanych próbek. Jako temperaturę końcową  $t_3$  przyjęto dla pszenicy i jęczmienia maksymalną temperaturę wody, a dla ziemniaków temperaturę wody po odjęciu przyrostów temperatur powstałych na skutek pęcznienia. W wyniku pomiarów otrzymano: ciepło właściwe suchej masy dla pszenicy ( $0,319 \pm 0,011$ ) kcal/kg  $^{\circ}\text{C}$ , jęczmienia ( $0,342 \pm 0,024$ ) kcal/kg  $^{\circ}\text{C}$  i plasterków ziemniaka ( $0,373 \pm 0,027$ ) kcal/kg  $^{\circ}\text{C}$ .

Dla niektórych płodów rolnych Pabis /28/ podaje wartości ciepła właściwego suchej masy (tab. 1).

Tabela 1. Ciepło właściwe suchej masy niektórych płodów rolnych

| Materiały       | Ciepło właściwe suchej masy w kcal/kg s.m. $^{\circ}\text{C}$ |
|-----------------|---------------------------------------------------------------|
| Ziarna pszenicy | 0,35-0,37                                                     |
| — soi           | 0,40                                                          |
| — żyta          | 0,36                                                          |
| — owsa          | 0,36                                                          |
| — kukurydzy     | 0,27-0,48                                                     |
| — prosa         | 0,34                                                          |
| Siano łąkowe    | 0,34-0,43                                                     |

Jegorow i Ljubuszkińska /14/ podają dla ziarna kukurydzy następującą zależność, otrzymaną w wyniku badań doświadczalnych:

$$c = 0,267 + u.$$

Wartość 0,267 jest ciepłem właściwym suchej masy badanych ziaren.

Kamiński /15/ określa nieznana dotychczas zależność ciepła właściwego „c” od wilgotności „w” oraz zawartości wody „u” dla ziemniaków. Zależności określano na drodze analitycznej i wykresowej. Pomiaru prowadzono przy użyciu kalorymetru, uwzględniając współczynnik strat ciepła w kalorymetrze. Uzyskany przyrost temperatury wody w kalorymetrze służył do określenia ciepła właściwego próbki:

$$c = \frac{W (t_2 - t_1)}{M (t_3 - t_2)}$$

z uwzględnieniem strat ciepła

$$c' = c \cdot \varphi$$

gdzie

- c - ciepło właściwe próbki,
- W - masa wody,
- M - masa próbki,
- $t_1$  - temperatura początkowa wody,
- $t_2$  - temperatura końcowa wody,
- $t_3$  - temperatura nagrzania próbki.

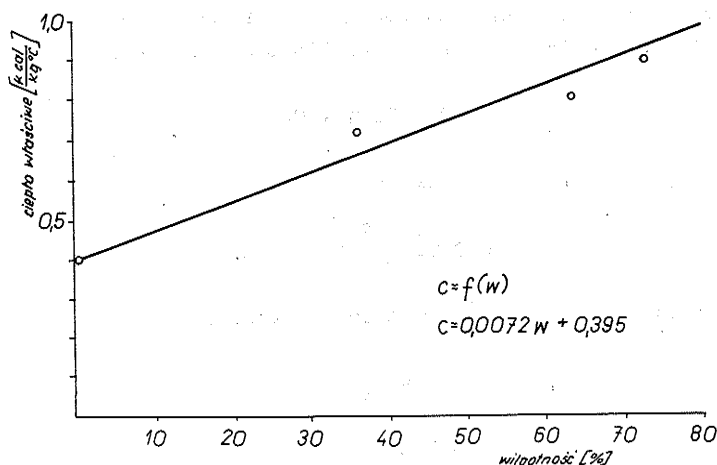
Badania prowadzono na próbkach ziemniaków o czterech poziomach wilgotności:

sucha masa

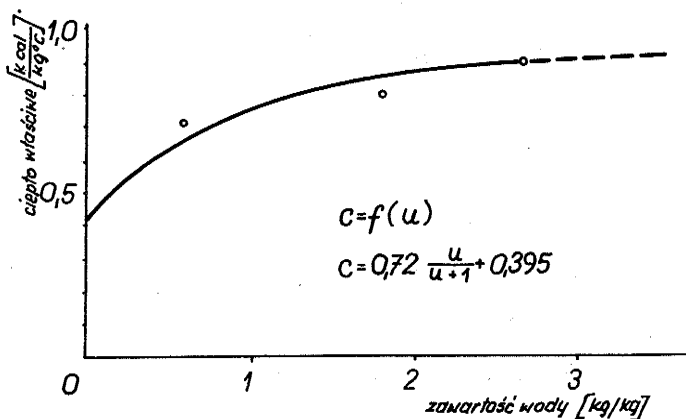
w = 72%      u = 2,22

w = 63%      u = 1,80

w = 36%      u = 0,57



Ryc. 1. Zależność ciepła właściwego ziemniaków od wilgotności



Ryc. 2. Zależność ciepła właściwego ziemniaków od zawartości wody /wg 15/

Ryciny 1 i 2 obrazują otrzymane zależności  $c = f(w)$  i  $c = f(u)$ . Zależność  $c = f(w)$  jest liniowa o równaniu

$$c = 0,0072 w + 0,395$$

natomiast  $c = f(u)$  o równaniu

$$c = 0,72 \frac{u}{1+u} + 0,395.$$

Wskazuje to wyraźnie na niezgodność z równaniem

$$c = c_s + u,$$

słusznym dla zbóż.

Zmierzone ponadto ciepło właściwe suchej masy, określając jego wartość na  $0,395 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ .

Jednym z podstawowych parametrów, które określają warunki wymiany ciepła i masy w warstwie wilgotnych ciał stałych, jest przewodność cieplna. Zagadnienie wyznaczania przewodności cieplnej jest bardzo skomplikowane ze względu na różnorodność czynników, od jakich zależy. Ogólnie przewodność cieplną warstwy materiału ziarnistego wyraża zależność /28/:

$$\lambda = f(\lambda_s, \lambda_p, u, t, p)$$

gdzie

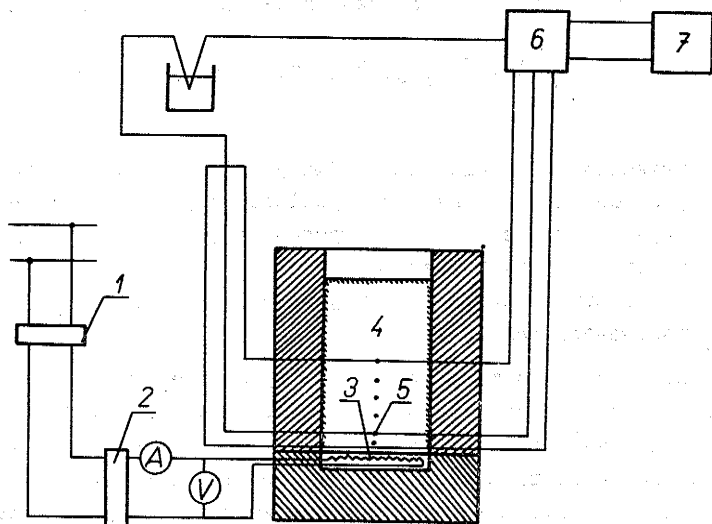
- $\lambda_s$  - przewodność cieplna suchej masy w danej temperaturze,
- $\lambda_p$  - przewodność pary gazowej wypełniającej przestrzenie międzyziarnowe w danej temperaturze,
- $u$  - zawartość wody w ziarnie,
- $t$  - temperatura ziarna i pary gazowej,
- $p$  - porowatość warstwy.

Przewodność cieplna masy zboża zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem się wielkości ziaren i zwiększeniem ilości porów powietrznych między poszczególnymi ziarnami w masie zboża; i tak przewodność cieplna nasion maku i lnu jest znacznie mniejsza od przewodności cieplnej nasion słonecznika i soi /1/. Przekazywanie ciepła w masie zbożowej odbywa się na skutek przewodności cieplnej i konwekcji. Konwekcja polega tu na przemieszczaniu się ogrzanych cząstek powietrza w przestrzeniach międzyziarnowych od wyżej położonych warstw masy zboża. Przewodność cieplna obniża się także przy zmniejszaniu wilgotności zboża, ponieważ przewodność cieplna wody jest znacznie większa od przewodności cieplnej powietrza.

Pabis i Gadał /29, 30, 32/ prowadzili pomiary przewodności cieplnej warstwy wilgotnych nasion w izolowanej cieplnie cylindrycznej komorze pomiarowej, której schemat podaje ryc. 3. Umieszczone w komorze pomiarowej termopary mierzyły temperaturę w odpowiednio wybranych punktach warstwy. Znajdująca się w dolnej części komory grzałka dawała stały strumień ciepła. Temperaturę rejestrowano co 5 minut za pomocą galvanometru. Zastosowana przez autorów metoda oparta jest na zagadnieniu wymiany ciepła w ciele półograniczonym z cieplną izolacją

boczną. Równanie opisujące to zjawisko w obszarze  $0 \leq x \leq \infty$  ma postać

$$\frac{\partial t(x, \Theta)}{\partial \Theta} = a \frac{\partial^2 t(x, \Theta)}{\partial x^2}.$$



Ryc. 3. Schemat urządzenia pomiarowego do wyznaczania przewodności cieplnej /wg 29/: 1 - stabilizator napięcia, 2 - auto-transformator, 3 - grzejnik, 4 - komora pomiarowa, 5 - termopary, 6 - przełącznik, 7 - galwanometr

Przy założeniu stałych warunków początkowych, określanych przez stałą temperaturę ( $t_0$ ) w warstwie w dowolnym miejscu ( $x$ ) warstwy,

$$t(x, 0) = t_0 = \text{const dla } 0 \leq x \leq \infty$$

oraz

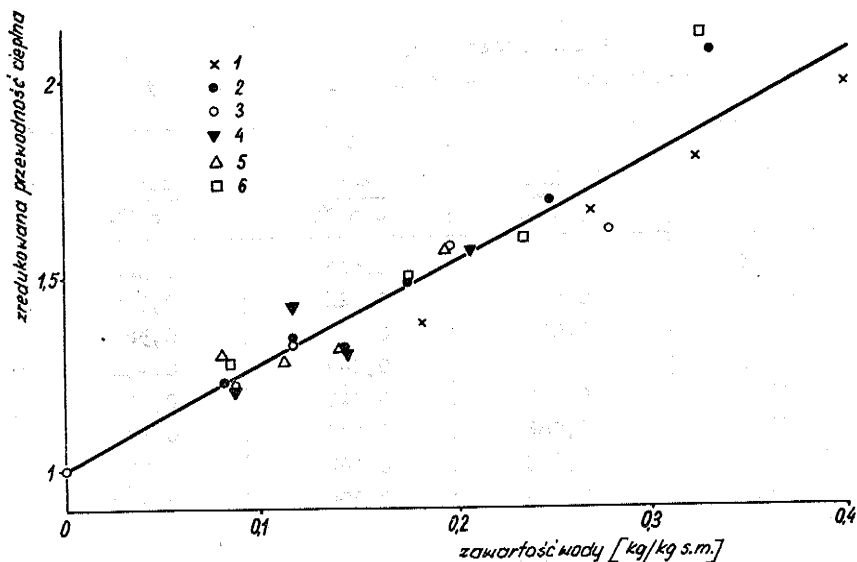
$$t(\infty, \Theta) = t_0$$

i warunku brzegowego  $t(0, \Theta) = k \sqrt{\Theta}$

rozwiązano to równanie otrzymując wyrażenia na  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{c \gamma_u x^2 F_0}{\Theta}$$

Znajdując z odpowiednich zależności  $F_0$  (liczbę Fouriera), z oddzielnych pomiarów „c” (ciepło właściwe) i mierząc gęstościomierzem  $\gamma_u$  (masę 1 m<sup>3</sup>) obliczono wartości  $\lambda$ . Przy pomocy tej metody wyznaczono przewodność cieplną w zależności od zawartości wody dla nasion fasoli, kukurydzy, bobiku, grochu, łubinu i rzepaku. W wyniku badań stwierdzono liniowy przyrost przewodności cieplnej badanych nasion w miarę wzrostu zawartości wody. Ryc. 4 przedstawia zależność zredukowanej przewod-



Ryc. 4. Zależność zredukowanej przewodności cieplnej w nasionach od zawartości wody /wg 30/: 1 - kukurydza, 2 - bobik, 3 - fasola, 4 - groch, 5 - łubin, 6 - rzepak

ności cieplnej (wartość przewodności cieplnej o danej zawartości wody podzielona przez wartość przewodności cieplnej su-

chej masy) od zawartości wody. Udowodniono, że przewodność cieplna rośnie szybko z zawartością wody. Przyrost  $\lambda$  o 50% spowodowany jest wzrostem „u” o 0,2 kg H<sub>2</sub>O/kg s.m.

Rzeczą charakterystyczną wykrytą przez autorów jest fakt identycznej matematycznej formy związku między przewodnością cieplną a zawartością wody we wszystkich badanych nasionach. Związek ten przedstawiono wzorem

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

Tabele 2 i 3 podają przykładowo otrzymane wartości  $\lambda$  dla masy 1 m<sup>3</sup> nasion pszenicy i jęczmienia oraz ciepła właściwego w funkcji zawartości wody.

Tabela 2. Przewodność cieplna i ciepło właściwe w zależności od zawartości wody dla pszenicy

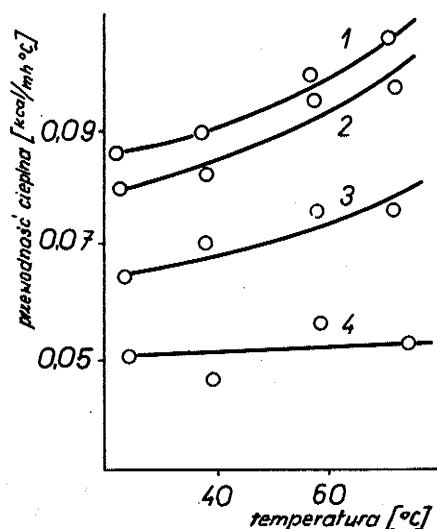
| w<br>% | u<br>kg H <sub>2</sub> O<br>kg s.m. | $\lambda$<br>kcal<br>m.h °C | c<br>kcal<br>kg °C |
|--------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 0      | 0                                   | 0,103                       | 0,320              |
| 4,5    | 0,047                               | 0,122                       | 0,367              |
| 6,3    | 0,067                               | 0,125                       | 0,387              |
| 10,1   | 0,112                               | 0,141                       | 0,432              |
| 12,8   | 0,147                               | 0,140                       | 0,467              |
| 15,8   | 0,188                               | 0,149                       | 0,508              |
| 18,4   | 0,225                               | 0,163                       | 0,545              |
| 26,3   | 0,357                               | 0,209                       | 0,677              |

Roskacz /34/ badał zależność przewodności cieplnej zielonej koniczyny od temperatury i wilgotności, poczynając od wilgotności 75% do absolutnie suchej masy. Wykazał, że  $\lambda$  dla suchej masy nie zmienia się w zależności od temperatury w przedziale  $t = 25^{\circ} - 75^{\circ}\text{C}$ , rośnie natomiast ze wzrostem temperatury wilgotnej masy (ryc. 5). Ponadto wykazał, że im wyższa wilgotność koniczyny tym większy współczynnik  $\lambda$  przy danej, sta-

Tabela 3. Przewodność cieplna i ciepło właściwe w zależności od zawartości wody dla jęczmienia

| w<br>% | u<br>$\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg s.m.}}$ | $\lambda$<br>$\frac{\text{kcal}}{\text{m.h } ^\circ\text{C}}$ | c<br>$\frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$ |
|--------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 0      | 0                                                   | 0,102                                                         | 0,342                                                |
| 6,3    | 0,067                                               | 0,128                                                         | 0,409                                                |
| 9,9    | 0,110                                               | 0,130                                                         | 0,452                                                |
| 11,2   | 0,126                                               | 0,154                                                         | 0,768                                                |
| 13,6   | 0,157                                               | 0,141                                                         | 0,499                                                |
| 17,5   | 0,212                                               | 0,172                                                         | 0,554                                                |
| 21,8   | 0,279                                               | 0,205                                                         | 0,621                                                |
| 26,3   | 0,357                                               | 0,243                                                         | 0,699                                                |

łej gęstości usypnej. Wzrost przewodności cieplnej, który towarzyszy wzrostowi temperatury tłumaczy autor wymianą ciepła przez promieniowanie w porach materiału.

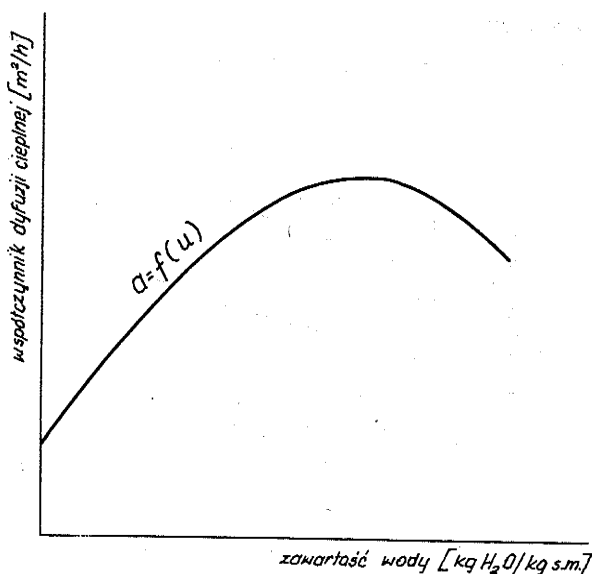


Ryc. 5. Zależność przewodności cieplnej koniczyny od temperatury dla różnych wilgotności: 1 - 75%, 2 - 60%, 3 - 40%, 4 - 0%  
/wg 34/

Wielkość obliczona na podstawie znajomości ciepła właściwego i przewodności cieplnej materiału, czyli współczynnik dyfuzji cieplnej

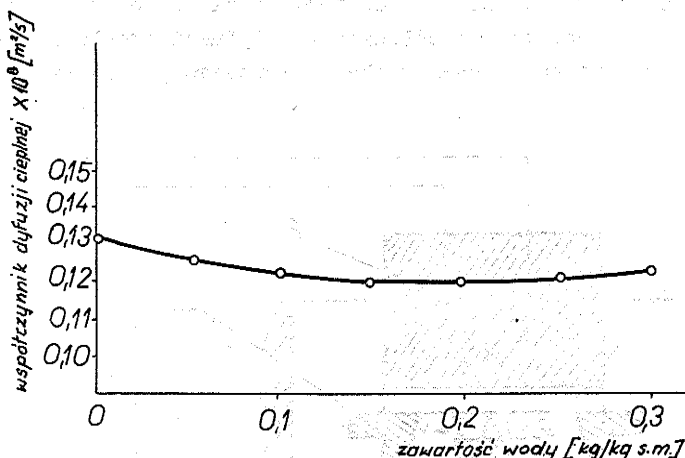
$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

okazuje się tą cechą fizyczną suszonego materiału, która decyduje o szybkości rozchodzenia się ciepła w warstwie wilgotnej masy. Wartość tego współczynnika zależy od rodzaju ciała, jego temperatury i zawartości wody /28, 30, 32, 34/. Współczynnik dyfuzji cieplnej zmielonej koniczyzny przy wilgotności  $w = 0\%$ , gęstości usypnej  $174 \text{ kg/m}^3$  i temperaturze  $25-75^\circ\text{C}$  wynosi  $7,18-7,43 \cdot 10^4 \text{ m}^2/\text{h}$  /34/. Z powiększeniem wilgotności współczynnika „a” początkowo rośnie, potem maleje ( $w = 40\%$   $a_{\text{sr}} = 8,42 \cdot 10^4$ ,  $w = 60\%$   $a_{\text{sr}} = 8,25 \cdot 10^4$ ,  $w = 75\%$   $a_{\text{sr}} = 7,5 \cdot 10^4$ ). Taki charakter zmiany „a” jest typowy dla



Ryc. 6. Poglądowe przedstawienie zależności współczynnika dyfuzji cieplnej wilgotnego ciała stałego od jego zawartości wody /wg 28/

ciał kapilarno-porowatych (ryc. 6). Zmiana współczynnika dyfuzji cieplnej tłumaczona jest zmianą formy wiązania wody w materiale /21/.



Ryc. 7. Zależność współczynnika dyfuzji cieplnej od zawartości wody dla nasion niektórych roślin uprawnych /wg 32/

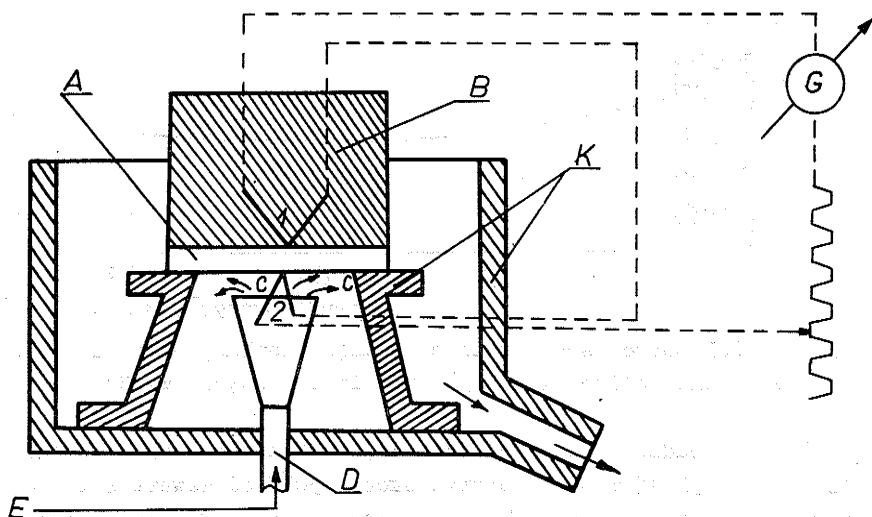
Pabis i Gadaż /32/ przedstawiają zależność współczynnika dyfuzji cieplnej w temperaturze około 30°C od zawartości wody dla nasion niektórych roślin uprawnych (ryc. 7). Ze wzrostem zawartości wody w badanych nasionach następują jednakowo szybko zmiany współczynnika „a” niezależnie od rodzaju nasion. Wartość „a” w warstwie tych nasion określono równaniem

$$a = a_0 \frac{\gamma_{u_0} c_0}{\gamma_u (c + u)} (1 + 2,668u),$$

gdzie

- $a_0$  - współczynnik dyfuzji cieplnej w warstwie absolutnie suchych nasion,
- $\gamma_{u_0}$  - ciężar objętościowy suchej masy ziarna,
- $\gamma_u$  - ciężar objętościowy ziarna,
- $c_0$  - ciepło właściwe suchej masy,
- $c$  - ciepło właściwe ziarna,
- $u$  - zawartość wody.

Wolkensztajn /36/ opracował szybką metodę pomiaru termofizycznych cech materiałów, pozwalającą wyznaczyć je jednocześnie na tej samej aparaturze z dokładnością do 2%. Metodę tę zastosowała Biłowicka /2/ do pomiaru ciepła właściwego, przewodności cieplnej i współczynnika dyfuzji cieplnej plasterka ziemniaka. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawia ryc. 8.



Ryc. 8. Schemat stanowiska pomiarowego do jednoczesnego wyznaczania ciepła właściwego, przewodności cieplnej i współczynnika dyfuzji cieplnej /wg 2/: A - plasterka badanego materiału, B - cylinder gipsowy z wtopioną końcówką 1 termopary różnicowej, izolowany błoną polietylenową przed zamakaniem, C - strumień wody o ustalonej temperaturze omywający dolną powierzchnię plasterka A, D - przewód doprowadzający ogrzaną wodę, E - dopływ wody z ultratermostatu, K - podstawa przyrządu, będąca równocześnie pojemnikiem dla przepływającej wody, 2 - druga końcówka termopary różnicowej, przylegająca do dolnej powierzchni badanego plasterka, omywana przez strumień ogrzanej wody

Pomiar wykonywano na plasterku ziemniaka o temperaturze równej temperaturze otoczenia, za pomocą termopary różnicowej. Jedną końcówkę termopary doprowadzono do badanego materiału, mierząc jego temperaturę, drugą natomiast umieszczono z drugiej strony plasterka w strumieniu wody o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia. Różnicę temperatur wskazywał galwanometr. Na skutek ogrzewania plasterka ziemniaka strumieniem ciepłej wody różnica temperatur malała, co wskazywał galwanometr. Mierzony czas wyrównywania się temperatur posłużył do obliczenia szukanych współczynników podanych w postaci:

$$a = \frac{R^2}{4p \Delta \tau} \quad \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{h}} \right]$$

$$\lambda = b \varepsilon \sqrt{a} \quad \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{mh } ^\circ\text{C}} \right]$$

$$c = \lambda / a \delta \quad \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \right]$$

gdzie

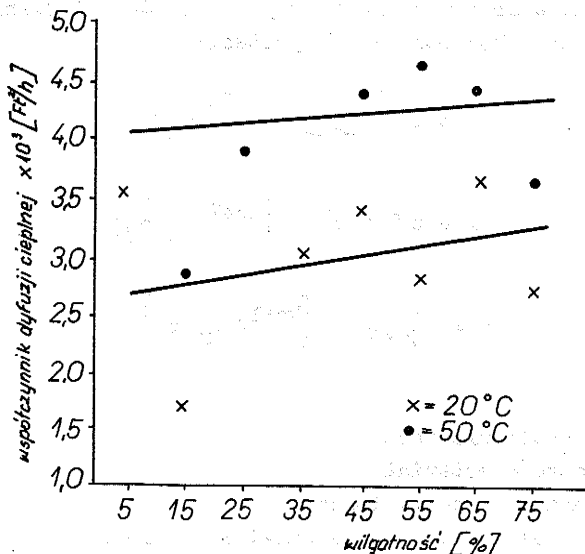
- R - grubość plasterka,
- $\delta$  - gęstość materiału,
- $\varepsilon, p$  - parametry bezwymiarowe,
- b - wartość stała dla stanowiska pomiarowego, wyznaczona w taki sam sposób, jak cechy termofizyczne, lecz przy zastosowaniu materiału o znanym cieple właściwym i gęstości:

$$b = \frac{c \gamma R}{2c \sqrt{p \Delta \tau_1}} .$$

Wykazano, że szybka metoda pomiaru nieustalonej wymiany ciepła zastosowana przez Wolkenstajna nie jest przydatna do oznaczania cech termofizycznych materiałów rolniczych, ponieważ względny błąd przewodności cieplnej wynosił około 45%.

Ford i Bilański /7/ skonstruowali aparat do pomiarów współ-

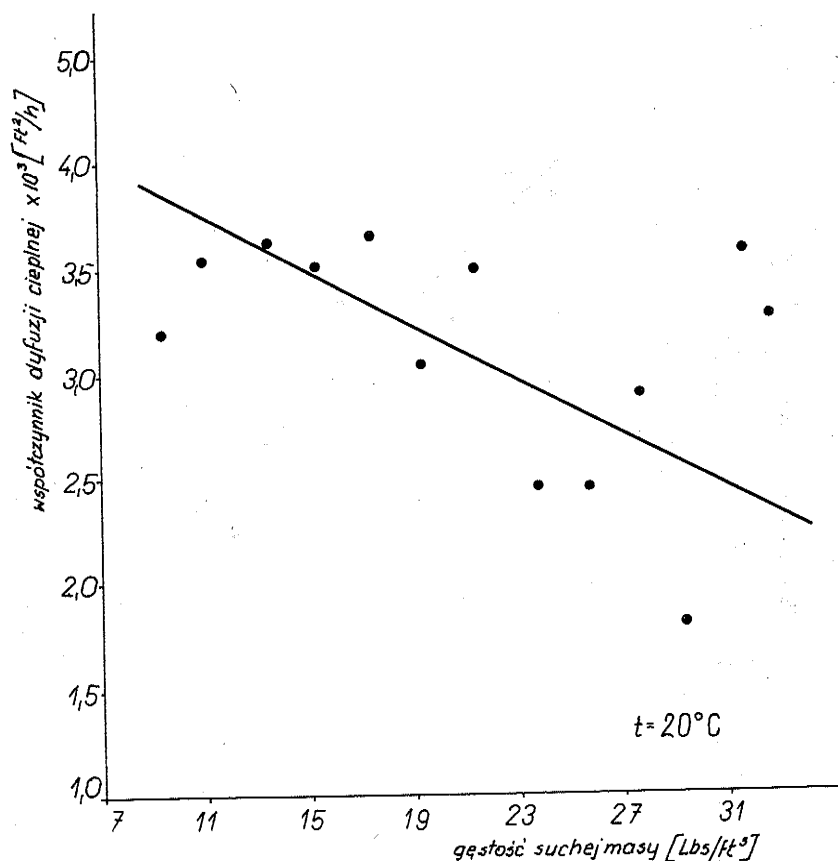
czynnika dyfuzji cieplnej łądyg lucerny. Zastosowana metoda polegała na badaniu zmiany radialnego gradientu temperatury łądygi przy zmianie temperatury otoczenia. Autorzy badali wpływ gęstości suchej masy, zawartości wilgoci i temperatury łądygi na współczynnik dyfuzji cieplnej. Wpływ zawartości wilgoci i gęstości suchej masy badano przy trzech różnych poziomach temperatury: 20°, 50° i 80°C. W każdej serii przeprowadzano doświadczenia na łądygach o wilgotności od 5 do 75%.



Ryc. 9. Zależność współczynnika dyfuzji cieplnej łądyg lucerny od wilgotności /wg 7/

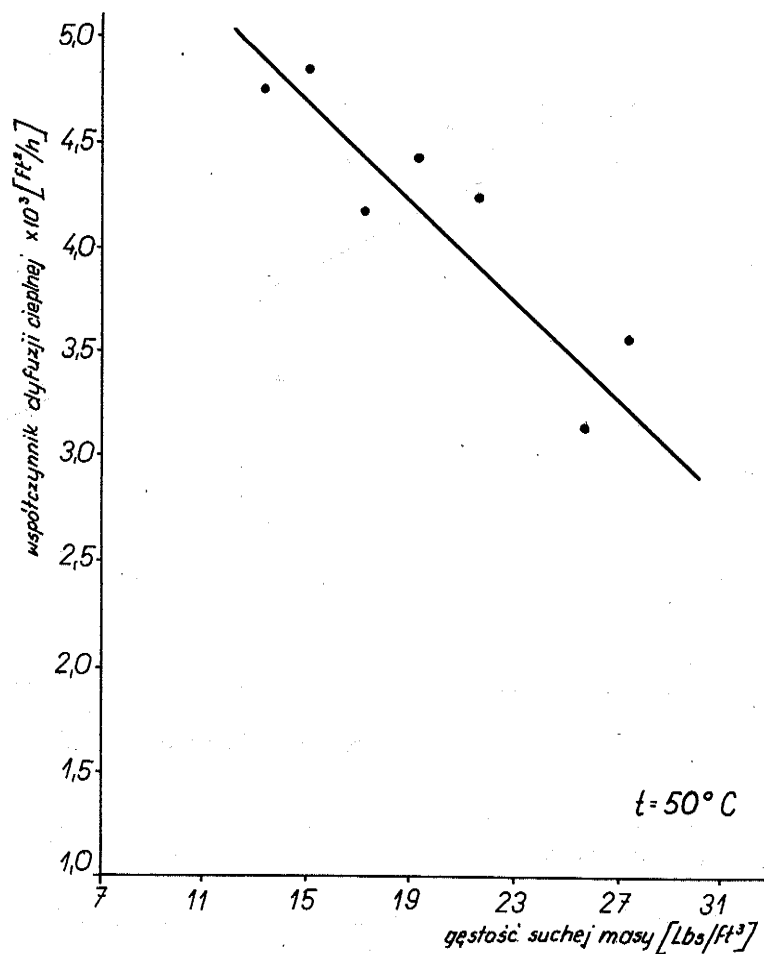
Stwierdzono, że współczynnik dyfuzji cieplnej ma tendencję do wzrastania przy wzroście zawartości wilgoci przy każdej z trzech stosowanych temperatur (ryc. 9). Nie zaobserwowano natomiast istotnych różnic w nachyleniu wykresów pomiędzy tymi trzema poziomami temperatury.

Na ryc. 10-12 przedstawiono zależność współczynnika dyfuzji cieplnej od gęstości suchej masy. W tym przypadku również nie zaobserwowano istotnych różnic pomiędzy nachyleniem krzywych dla przyjętych temperatur. Ujemne nachylenie wykresów można

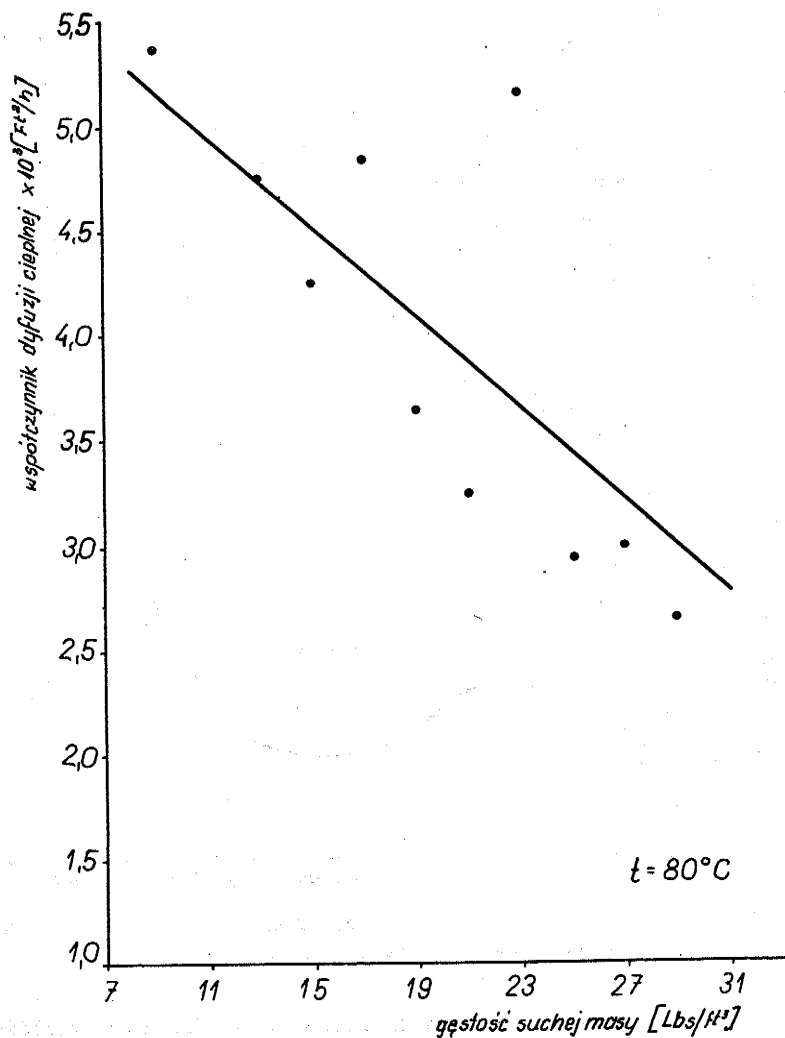


Ryc. 10. Zależność współczynnika dyfuzji cieplnej łądyg lucerny od gęstości suchej masy przy temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$  /wg 7/

było wytłumaczyć porównując względny współczynnik dyfuzji ciepła wody lub powietrza do celulozy. Całkowity współczynnik dyfuzji łądygi jest sumą współczynników dyfuzji cieplnej składników łądygi, wobec czego zmiany w proporcjach tych składników muszą spowodować zmianę całkowitego współczynnika. Ponieważ ilość suchej masy z jej niskim współczynnikiem dyfuzji cieplnej wzrasta, dyfuzyjność termiczna łądygi jako całości musi

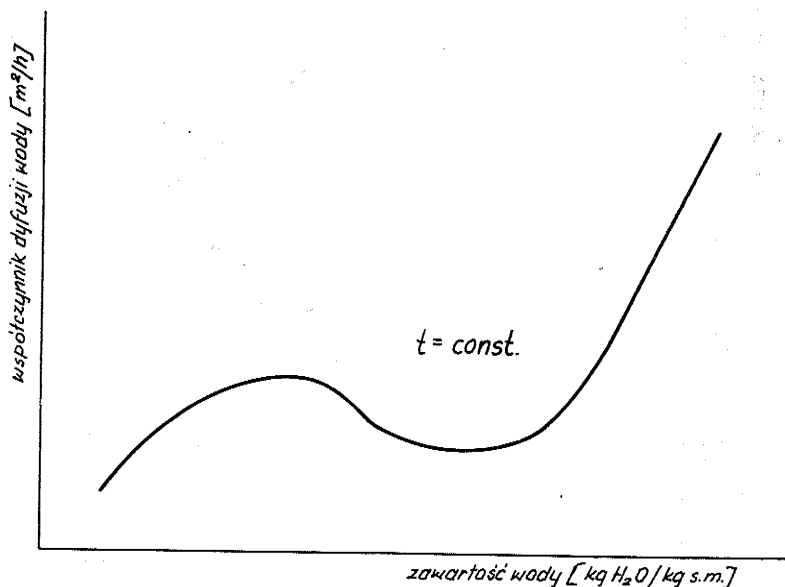


Ryc.11. Zależność współczynnika dyfuzji cieplnej łodyg lucerny od gęstości suchej masy przy temperaturze  $50^{\circ}\text{C}$  /wg 7/



Ryc.12. Zależność współczynnika dyfuzji cieplnej łądyg lucerny od gęstości suchej masy przy temperaturze  $80^{\circ}\text{C}$  /wg 7/

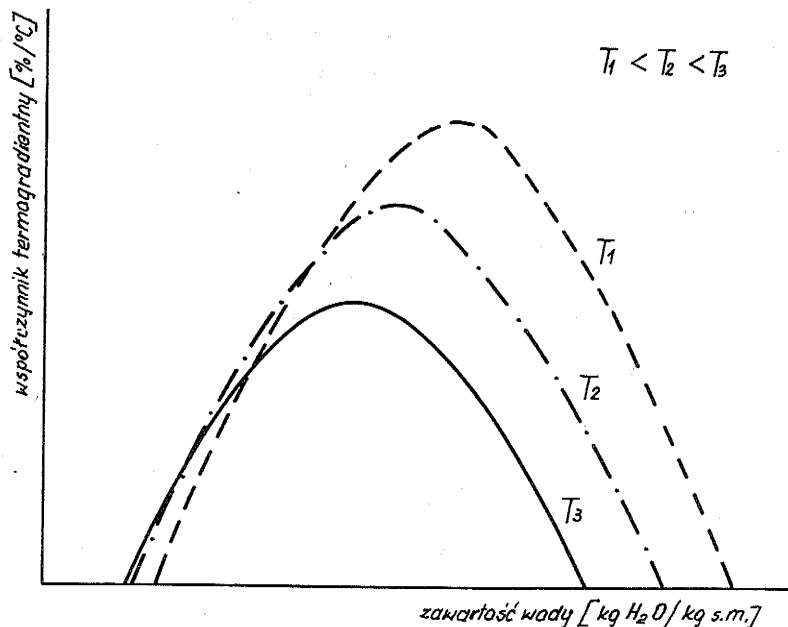
zmaleć. Z ryc. 9 i 12 wynika, że współczynnik dyfuzji cieplnej łądygi lucerny rośnie ze wzrostem temperatury. Zauważono, że gwałtowne parowanie wilgoci, które występuje przy wyższych temperaturach, ma istotny wpływ na badany współczynnik. Zaobserwowano ponadto, że spośród trzech badanych zmiennych (temperatura, wilgotność, gęstość), największy wpływ na współczynnik dyfuzji cieplnej miała gęstość suchej masy. Biorąc pod uwagę jedynie gęstość suchej masy, a nie rozpatrując wpływu pozostałych czynników, popełniono tylko błąd o wartości  $\pm 10\%$  współczynnika dyfuzji cieplnej.



Ryc.13. Poglądowa zależność współczynnika dyfuzji wody od zawartości wody w ciele stałym /wg 28/

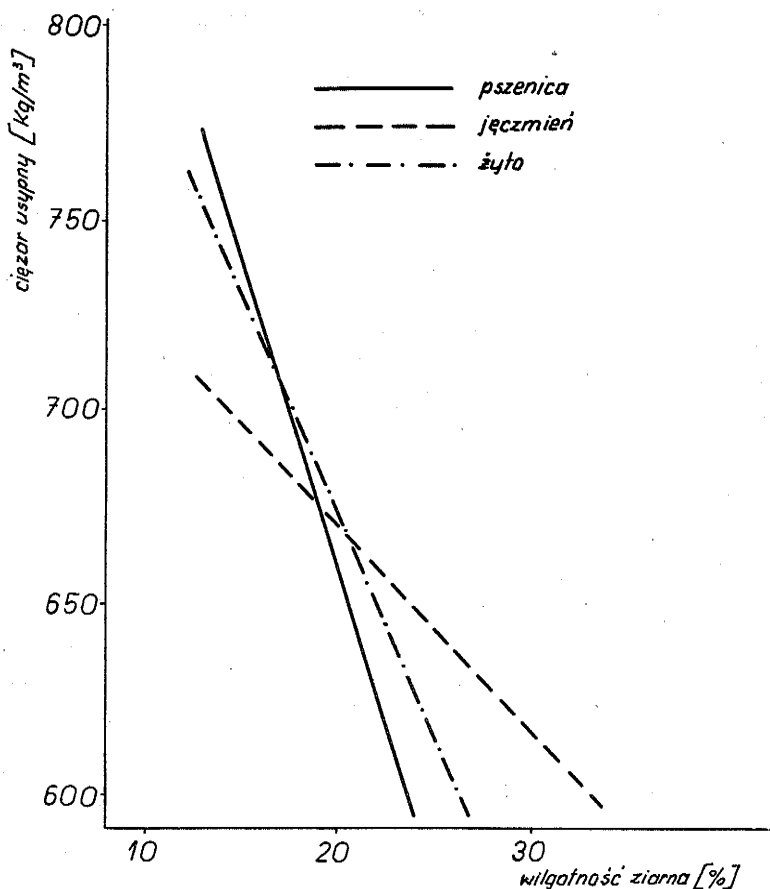
W procesie suszenia niemniej ważna jest znajomość wartości współczynnika dyfuzji wody  $a_m$  i współczynnika termogradientnego  $\delta$ . Współczynniki te określają natężenie strumienia wilgoci spowodowanego gradientami koncentracji wilgoci i temperatury. Zależności tych współczynników od zawartości wody i temperatury są mało znane dla materiałów roślinnych. Poglądową

zależność  $a_m = f(u)$  i  $\delta = f(u, T)$  dla ciał kapilarno-porowatych przedstawiają ryc. 13 i 14.



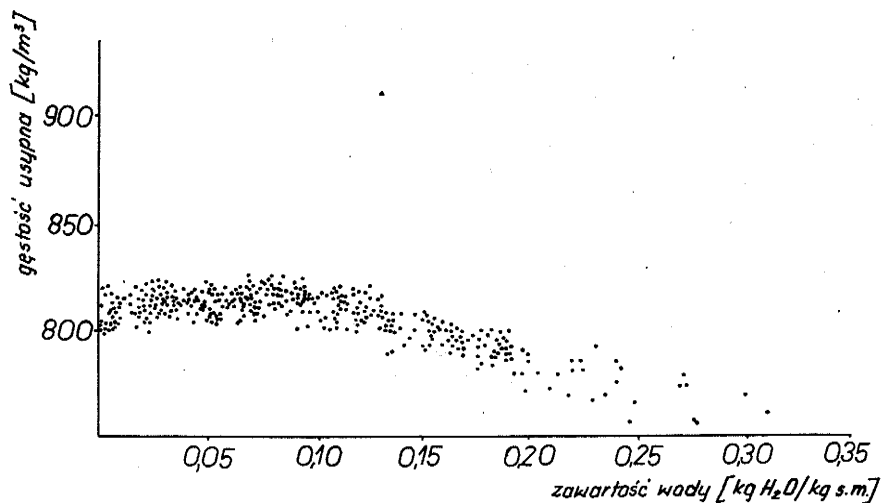
Ryc. 14. Poglądowa zależność współczynnika termogradientnego od zawartości wody i temperatury ciała stałego /wg 28/

Jedną z ważnych cech fizycznych płodów rolnych, mającą również istotne znaczenie w procesie suszenia, jest gęstość usypna materiału, zwana też ciężarem objętościowym. Biłowicka /4, 5/ obserwowała zależność gęstości usypnej nasion roślin strączkowych od zawartości wody. Zależność tej cechy od zawartości wody podawana jest w literaturze w postaci linii prostej w granicach wilgotności 12-25% (ryc. 15). Autorka badała tę zależność w granicach wilgotności od 0 do 30%. Próbkę nasion o określonej masie (około 400 g) umieszczono w kontrolowanych warunkach temperatury i wilgotności powietrza, aż do osiągnięcia stanu suchego. Bezpośrednio po każdym ważeniu dokonywano pomiaru gęstości usypnej materiału. Zauważono, że punkty do-

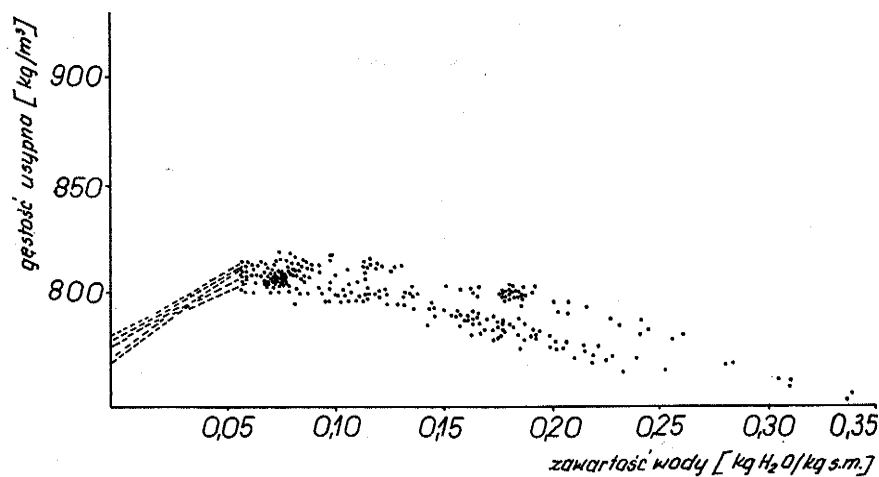


Ryc. 15. Zależność ciężaru usypnego ziarna pszenicy, żyta i jęczmienia od wilgotności ziarna /wg 4/

świadczały układają się w charakterystyczną linię krzywą (ryc. 16-18). Krzywe utrzymane dla czterech gatunków nasion miały podobny charakter: w pierwszej fazie wysychania gęstość nasion wzrastała, po czym następował punkt przegięcia krzywej i gęstość malała. Charakterystyczny przebieg zależności gęstości usypnej od zawartości wody tłumaczono różnym sposobem

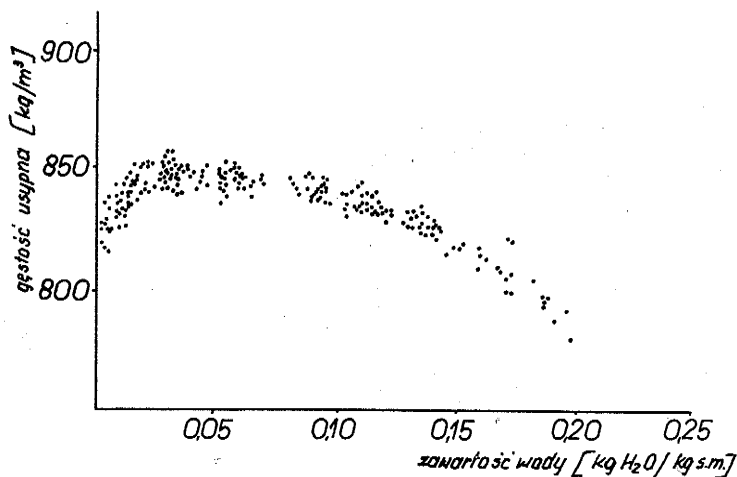


Ryc. 16. Zależność gęstości usypnej od zawartości wody dla nasion bobiku /wg 4/

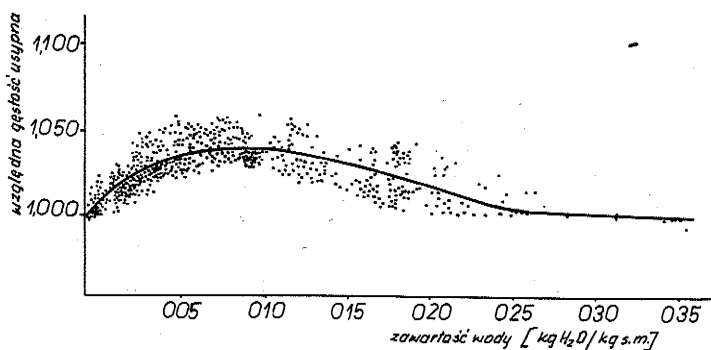


Ryc. 17. Zależność gęstości usypnej od zawartości wody dla nasion grochu /wg 4/

wiązania wilgoci przez nasiona w różnych stanach wilgotności. Początkowo wydaleniu ulegała woda zwilżająca powierzchnię nasion i wypełniająca kapilary, następnie woda związana adsorpcyjnie.



Ryc. 18. Zależność gęstości usypnej od zawartości wody dla nasion fasoli /wg 4/



Ryc. 19. Zależność względnej gęstości usypnej nasion grochu od zawartości wody; porównanie wyników /wg 4/

Zaobserwowano też, że na przebieg krzywej  $\chi_u = f(u)$  w obrębie jednego gatunku ma wpływ masa tysiąca nasion absolutnie suchych. Punkt przegięcia krzywej leży odpowiednio wyżej, im większa jest wartość tej masy.

W granicach wilgotności od 0 do 3-5% badana zależność jest liniowa, co nasuwa przypuszczenie, że na zmianę wartości gęstości usypnej w tym zakresie wilgotności wpływa jedynie zmiana zawartości wody.

Dokonano również opisu matematycznego zmiany gęstości usypnej, wywołanej zmianą zawartości wody, i przedstawiono równanie empiryczne w postaci wielomianu czwartego stopnia /4, 5, 9/:

$$\frac{\chi_u}{\chi_{u_0}} = \frac{1 + u}{1 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + a_4 u^4},$$

gdzie  $a_1, a_2, a_3, a_4$  są współczynnikami wyznaczonymi z danych doświadczalnych metodą najmniejszych kwadratów przy pomocy maszyny cyfrowej. Wartości tych współczynników są różne dla różnych gatunków nasion. Porównano także dane uzyskane z rozwiązania przedstawionego wyżej równania z danymi eksperymentalnymi (ryc. 19), otrzymując dużą zgodność wyników.

#### PODSUMOWANIE

Przedstawione zagadnienia związane z ważnym procesem wymiany ciepła i masy w materiałach roślinnych wskazują na ich istotne znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne. Dotychczasowe prace traktują niejednokrotnie bardzo wycinkowo ten obszerny problem, częstokroć w odniesieniu do nielicznych roślin czy wybranego parametru. Niewiele jeszcze wiadomo o wpływie czynników wewnętrznych na ilościowe i jakościowe zmiany właściwości fizycznych materiałów roślinnych. Często zmiany takie podaje się w formie opisowej, rzadko zaś stosuje się dokładne wielowariantowe opracowania matematyczne, które stanowiłyby cenny opis teoretyczny na podstawie badań eksperymentalnych.

Metodyka niektórych badań może budzić również pewne zastrzeżenia z uwagi na występujący często subiektywizm pomiarów, prowadzący w sumie do wyciągania zbyt ogólnych wniosków lub przypuszczeń i wstępnych przewidywań. Daje się zatem zauważyć pewien brak sprawdzonych obiektywnych metod. Stosowane dotychczas metody niekiedy różnią się diametralnie i stąd nie ma możliwości porównania wyników dla całościowej charakterystyki badanych zjawisk termofizycznych. Niektóre cechy fizyczne płodów rolnych, aczkolwiek ważne z praktycznego punktu widzenia, nie zostały jeszcze dostatecznie opracowane, w wyniku czego pewne elementy procesów konserwujących materiały roślinne odbywają się poza kontrolą człowieka. Rezultatem tego są straty wynikające zarówno ze zniszczenia materiału bądź zmniejszenia jego masy, jak i wyraźnego pogorszenia jakości.

Zmienność cech fizycznych płodów rolnych na skutek czynników zewnętrznych i procesów wewnętrznych wymaga zatem szczegółowego opracowania przez szerokie rozwinięcie badań podstawowych w ujęciu kompleksowym, dla poznania wszystkich właściwości, dynamiki zachodzących procesów w różnych warunkach oraz opracowania matematycznych modeli, które pozwoliłyby w pełni opisać występujące zależności, aby w efekcie związać je z praktyką.

## LITERATURA

1. Biekasow A.G., Dienisow N. I.: Suszenie zboża, WPLiS, Warszawa 1956.
2. Biłowicka E.: Sprawdzenie na ziemniaku szybkiej metody wyznaczania termofizycznych cech materiału, Biul. Inf. IMER, 7 (80), 1971.
3. Biłowicka E.: Badania nad suszeniem drobnych nasion promieniami podczerwonymi, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., nr 26, 1961.
4. Biłowicka E.: Cechy fizyczne nasion roślin strączkowych, Biul. Inf. IMER, 7 (80), 1971.
5. Biłowicka E.: Określenie zależności niektórych cech fizycznych nasion roślin strączkowych od zawartości wody w nasionach, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., nr 135, 1972.
6. Chung D. S., Pfost H. P.: Adsorption and desorption of water vapor by cereal grain and their products. A hypothesis for explaining the hysteresis effect, Trans. ASAE, 10 (4), 1967.
7. Ford R. M., Bilański W.K.: Thermal diffusivity of alfalfa stems, Trans. ASAE, 12 (2), 1969.
8. Gadał S.: Ciepło właściwe niektórych płodów rolnych, IMER, symbol XXII/432 (maszynopis).
9. Gadał S., Suprunowicz R.: Matematyczno-fizyczny opis zależności gęstości usypnej niektórych nasion roślin strączkowych od zawartości wody, Biul. Inf. IMER, 7 (80), 1971.
10. Hart J. R.: Hysteresis effects in mixtures of wheats taken from the same samples but having different moisture contents, Cereal. Chem., 41, 1964.
11. Henderson S. M.: Equilibrium moisture content of small grain-hysteresis, Trans. ASAE, 13 (6), 1970.

12. Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki, PWT, Warszawa 1953.
13. Houston D. F.: Hygroscopic equilibria of brown rice, Cereal. Chem., 29, 1952.
14. Jegorow G. A., Ljubuszkina B. T.: Kukuruza, t. 5, nr 3, 1960.
15. Kamiński E.: Pomiar ciepła właściwego ziemniaków o różnych wilgotnościach, Biul. Inf. IMER, nr 9, 1966.
16. Klenin N. I., Popow I. F., Sakun W. A.: Sielskochozjajstwiennyje maszyny. Izdat. Kołos, Moskwa 1970.
17. Kneule F.: Suszenie, Arkady, Warszawa 1970.
18. Liebediew P. D.: Suszka infrakrasnymi kuczami, Gosenergoizdat., Moskwa 1955.
19. Lis H.: Oddziaływanie przepływu powietrza na wymianę ciepła w procesie suszenia, Roczn. Nauk. Roln., t. 68-C-1, 1966.
20. Lityński M. i in.: Biologia nasion i nasiennictwo, PWN, Warszawa 1970.
21. Żyłow A. W.: Teorieticzeskije osnovy stroitielnoj tieplofizyki, Izdat. ANBSSR, Mińsk 1961.
22. Żyłow A. W.: Teoria tieploprawodnosti w kapilarnoporistych tiełach, Gos. Izdat. Tiech.-Tieoriet. Liter., Moskwa 1954.
23. Żyłow A. W., Michajłow J. A.: Teoria pierenosa energii i wieszczestwa, Izdat. Akad. Nauk BSSR, Mińsk 1959.
24. McBain J. W.: An explanation of hysteresis in the hydration and dehydration of gels, J. Amer. Chem. Soc., 57, 1935.
25. Michiejew M.: Zasady wymiany ciepła, PWN, Warszawa 1953.
26. Mohsenin N. N.: Physical properties of agricultural products. A new challenge for agricultural engineers, Trans. ASAE, 8 (1), 1965.
27. Pabis S.: Podstawy teoretyczne suszenia ziarna zbożowego nieogrzewanym powietrzem, Roczn. Nauk Roln., t. 66-C-4, 1954.
28. Pabis S.: Suszenie płodów rolnych, PWRiL, Warszawa 1965.
29. Pabis S.: Wyznaczanie przewodności cieplnej w warstwie ziarnistych produktów rolnych, Biul. Prac Nauk.-Badawczych, nr 5, 1967.
30. Pabis S.: Fizyczne cechy surowca przeznaczonego do sztucznego suszenia, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., nr 112, 1971.

31. Pabis S.: Wpływ różnicy psychrometrycznej, natężenia przepływu powietrza i obciążenia sita suszarni na przebieg sztucznego dosuszania lucerny, Zesz.Probl.Post.Nauk Roln., nr 26, 1961.
32. Pabis S., Gadaj S.: Przewodność cieplna warstwy ziarna i nasion, Biul.Inf.IMER, nr 12, 1970.
33. Połonskaja F. M., Mielnikowa I. W.: Tieplo- i massoobmien w processach isparienija, Izdat.Akad. Nauk SSSR, Moskwa 1958.
34. Roskacz M.P.: Niekotoryje swojstwa trawy i trawianoj muki, Sbornik naucznych rabot aspirantow, Mińsk 1967.
35. Smolskij B. M.: Inż.-Fiz. Żurnal, t. 1, nr 5, 1958.
36. Wolkensztajn W. S.: Skorostnoj metod izimierienija tieplo-fizycznych charakteristik matieriałow, Tieplo- i massopierienos, t. 1, 1962.
37. Young J. H., Nelson G. L.: Research of hysteresis between sorption and desorption isotherms of wheat, Trans.ASAE, 10 (10), 1967.
38. Zsigmondy R.: Z.Anorg.Allg.Chem., 71, 1911.



## SPIS TREŚCI

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Wprowadzenie . . . . .                                                                              | 5  |
| Wymiana ciepła i wilgoci w procesie suszenia . . . . .                                              | 6  |
| Histereza wilgoci, jej występowanie i mechanizm<br>tworzenia . . . . .                              | 12 |
| Wpływ parametrów wewnętrznych na niektóre cechy fi-<br>zyczne suszonych produktów rolnych . . . . . | 14 |
| Podsumowanie . . . . .                                                                              | 37 |
| Literatura . . . . .                                                                                | 39 |