

METODY OBLICZEŃ KINETYKI SUSZENIA WILGOTNYCH MATERIAŁÓW

W. W. KRASNIKOW — ZSRR

Charakter procesu suszenia przedstawiony w postaci krzywych suszenia, prędkości suszenia, nagrzewania oraz krzywych temperatury jest określany właściwościami fizykochemicznymi i strukturalno-mechanicznymi materiału, dyfuzyjną naturą zjawiska, jak też metodą doprowadzenia energii, tzn. prawidłowościami wzajemnego oddziaływania ciała z otaczającym środowiskiem.

Różnorodność czynników i ich wzajemne powiązanie w znacznym stopniu utrudniają analityczne przedstawienie kinetyki suszenia konkretnego materiału. Dlatego przy opisie suszenia zazwyczaj są wykorzystywane zależności empiryczne uzyskane podczas suszenia określonego materiału daną metodą. Bardziej dokładne jednak są przybliżone metody obliczeń kinetyki suszenia, oparte na badaniu ogólnych prawidłowości procesu. Do takich metod opracowanych w naszym kraju należy metoda Łykowa [1] i metoda Fiłonienki [3].

Ostatnio opracowano nowe przybliżone metody obliczeń, które rozpowszechniły się w ZSRR.

Własną metodę rozwiązania tego problemu przedstawiono w referacie.

Analiza wielu eksperymentalnych danych kinetyki suszenia różnych materiałów (ziarno, warzywa, nasiona winogron, liściaste i włókniste materiały, tkaniny, papier, karton, azbest, produkty chemiczne, torf i in.) różnymi metodami (konwekcyjna, kombinowana, promieniami podczerwonymi, we wrzącej warstwie), pozwoliła wysunąć następującą hipotezę: „przy suszeniu konkretnego materiału, posiadającego określoną początkową zawartość wody W_n , przy każdych warunkach suszenia pozostaje stała wielkość $N\tau$, odpowiadająca danej bieżącej zawartości wody W ”.

Ta hipoteza w formie matematycznej zapisu ma postać:

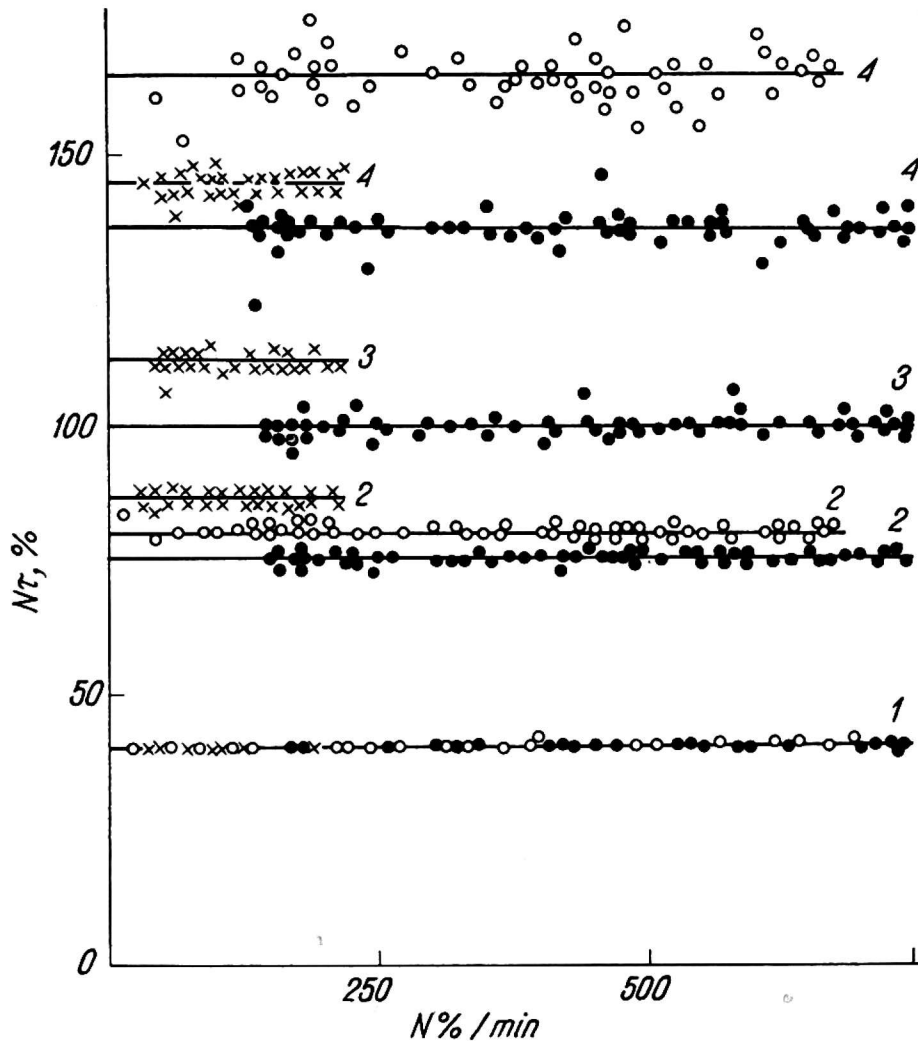
$$N_1\tau_1 = N_2\tau_2 = \dots, N_n\tau_n = (N\tau)_W = \text{const}, \quad (1)$$

gdzie:

N_1, N_2, \dots, N_n — prędkość suszenia w pierwszym okresie w różnych warunkach,
 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ — bieżący czas suszenia, w ciągu którego zawartość wody zmieniała się od W_n do W .

Na rysunku 1 przedstawiono zależność $N\tau$ od N różnych W przy kontaktowym i kombinowanym kontaktowo-konwekcyjnym przerywanym suszeniu celulozy o ciężarze 0,1 kg/m² i kartonu 0,4 kg/m².

Wielkość $N\tau$ w I okresie dla stałego W jest niezmienna dla materiałów o różnej masie właściwej, nie zależy od metody i warunków suszenia, lecz określana jest wielkościami W_n i W . W II okresie suszenia występują różnice w zależności od wartości W , od właściwej masy materiału oraz metody suszenia. Rozrzut wyników



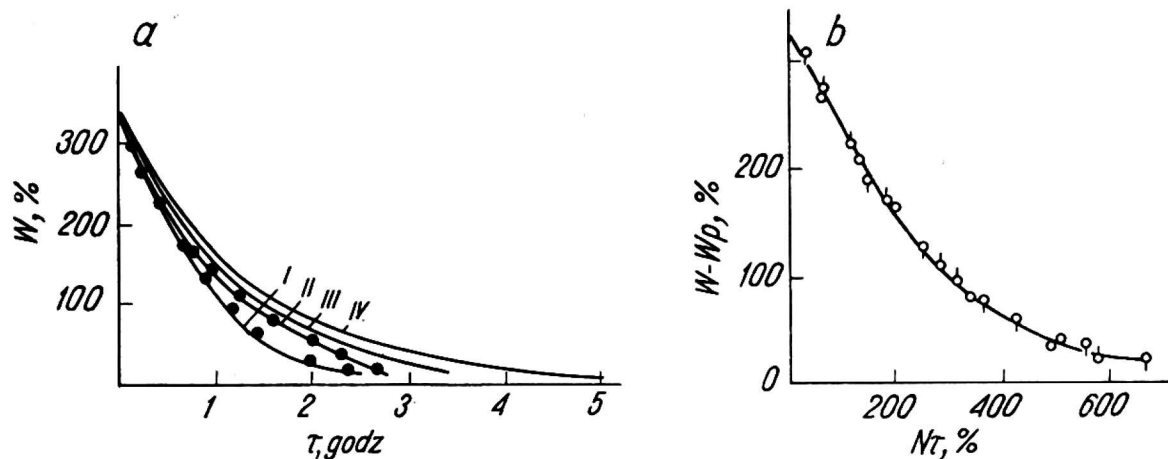
Rys. 1. Zależność wielkości $N\tau$ (%) od N (%/min) przy $W_n = 120\%$ dla różnych W : 1 — $W = 80\%$; 2 — $W = 45\%$; 3 — $W = 30\%$; 4 — $W = 15\%$;
a — kombinowane suszenie celulozy $0,1 \text{ kg/m}^2$, *b* — kontaktowe suszenie celulozy $0,1 \text{ kg/m}^2$,
c — kombinowane suszenie kartonu dachowego $0,4 \text{ kg/m}^2$

wzrasta ze zmniejszeniem bieżącej zawartości wody, jednak znajduje się w granicach tolerancji pomiarów.

Tak więc wszystkie uzyskane eksperymentalnie krzywe suszenia danego materiału, w różnych warunkach, przy stałej wartości W_n przedstawiają w układzie współrzędnych $W-N\tau$ na rysunku 2 jedną krzywą, będącą uogólnioną krzywą kinetyki suszenia. Na rysunku 3 przedstawiono takie krzywe dla kombinowanego kontaktowo-konwekcyjnego przerywanego suszenia różnych materiałów. Krzywe są oparte na wynikach 200 doświadczeń.

Wykorzystując równanie (1) można zaproponować drugą metodę uogólnienia krzywych suszenia

$$\frac{\tau_1}{\tau_{g1}} = \frac{\tau_2}{\tau_{g2}} = \dots = \frac{\tau_n}{\tau_{gn}} = \left(\frac{\tau}{\tau_g} \right)_W = \text{const}, \quad (2)$$

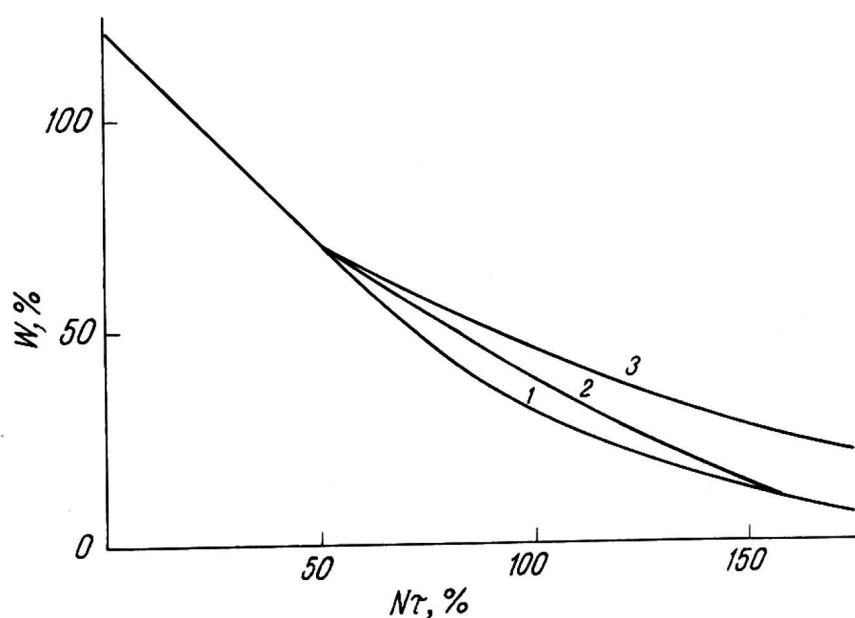


Rys. 2. Krzywe konwekcyjnego suszenia ziemniaków w różnych warunkach (a) oraz uogólniona krzywa kinetyki suszenia (b)

$t_0 = 80^\circ\text{C}$; $\varphi = 1,0\%$; I — $V_c = 4,5$ m/s; II — $3,8$ m/s; III — $2,5$ m/s; IV — $0,8$ m/s

gdzie $\tau_{g_1}, \tau_{g_2}, \dots, \tau_{g_n}$ — czas trwania suszenia od stałej zawartości wody w W_n do wartości końcowej W_k w różnych warunkach.

Nie zależnie zatem od warunków suszenia rodzina krzywych suszenia, które charakteryzują się stałymi W_n i W_k , przedstawia w układzie współrzędnych $W - \tau/\tau_g$, jedną krzywą suszenia. Metoda ta jest szczególnie wygodna, jeżeli w procesie nie występuje I okres suszenia.



Rys. 3. Uogólnione krzywe kinetyki kombinowanego suszenia

1 — celulozy $0,1$ kg/m², 2 — kartonu dachowego $0,4$ kg/m², 3 — SCM $1,355$ kg/m²

Możliwa jest również trzecia metoda uogólnienia krzywych suszenia, oparta na założeniu, że warunki suszenia materiału nie wpływają na wartość

$$K_1\tau_1 \simeq K_2\tau_2 \simeq \dots \simeq K_n\tau_n = (K\tau)_W = \text{const}, \quad (3)$$

gdzie K_1, K_2, \dots, K — współczynnik suszenia w różnych warunkach charakteryzujący cały II okres.

W tym przypadku uogólniona krzywa jest przedstawiona we współrzędnych $W-K\tau$. To uogólnienie może być zastosowane, jeżeli proces suszenia przebiega całkowicie w okresie zmniejszającej się prędkości suszenia.

Inwariantność wielkości $N\tau$, τ/τ_g , $K\tau$ przy określonej wilgotności materiału niezależnie od warunków suszenia przedstawia najbardziej uogólnioną prawidłowość kinetyki suszenia wilgotnych materiałów. Obok obliczeń kinetycznych może ona być wykorzystana przy określaniu zasad modelowania procesów suszenia.

Uogólnioną krzywą suszenia buduje się według jedynej doświadczalnej krzywej suszenia danego materiału, z określoną W_n , otrzymanej przy każdych warunkach suszenia. Jeżeli jest znana korelacyjna zależność N (lub τ_g , lub K) od podstawowych parametrów procesu suszenia, to przy pomocy uogólnionej krzywej można odtworzyć rodzinę krzywych suszenia (przy jednakowym W_n), odpowiadających różnym warunkom suszenia danego materiału, nie przeprowadzając eksperymentów.

Uogólniona krzywa suszenia $W-N\tau$ może być wyrażona za pomocą trzech równań (II okres składa się z dwóch części), według okresów opisujących kinetykę suszenia [2].

Za pomocą różniczkowania, według czasu równań kinetyki suszenia dla obydwu części drugiego okresu, można otrzymać wyrażenie na szybkość suszenia. Równania dla tak zwanej względnej szybkości suszenia przedstawiają się następująco:

$$N_1^* = dW/d\tau : N;$$

w pierwszej i drugiej części II okresu będą miały postać

$$N_1^* = 2,3\chi_1(W - W_p) \text{ przy } W_{kp_1} \geq W \geq W_{kp_2}, \quad (4)$$

$$N_2^* = 2,3\chi_2(W - W_p) \text{ przy } W_{kp_2} \geq W \geq W_k, \quad (5)$$

gdzie χ_1 i χ_2 — względne współczynniki suszenia, różne w dwóch częściach II okresu, które podobnie jak W_{kp_1} i W_{kp_2} znajduje się na podstawie uogólnionej krzywej suszenia wykreślonej, we współrzędnych półlogarytmicznych.

Zamiana rzeczywistej krzywej szybkości suszenia w II okresie, otrzymanej za pomocą graficznego różniczkowania krzywej suszenia, linią prostą (według metody A. W. Łykowa) lub w najlepszym przypadku krzywą łamaną według metody autora nie zawsze może być przeprowadzona, ponieważ operacja taka wywołuje dodatkowe błędy. Dlatego też celowym jest korzystanie z doświadczalnych krzywych szybkości suszenia aproksymowanych metodami doboru wzorów empirycznych.

Wielkość względnej szybkości suszenia N^* , przy danym W , jak wynika z uogólnionej krzywej suszenia $W-N\tau$, liczbowo równa się tangensowi kąta nachylenia krzywej do osi $N\tau$. Jest to bardzo ważne, bo znajduje się według uogólnionej krzywej suszenia bezpośrednio

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{dW}{d\tau} = \text{tg}(W, N\tau) = f(W). \quad (6)$$

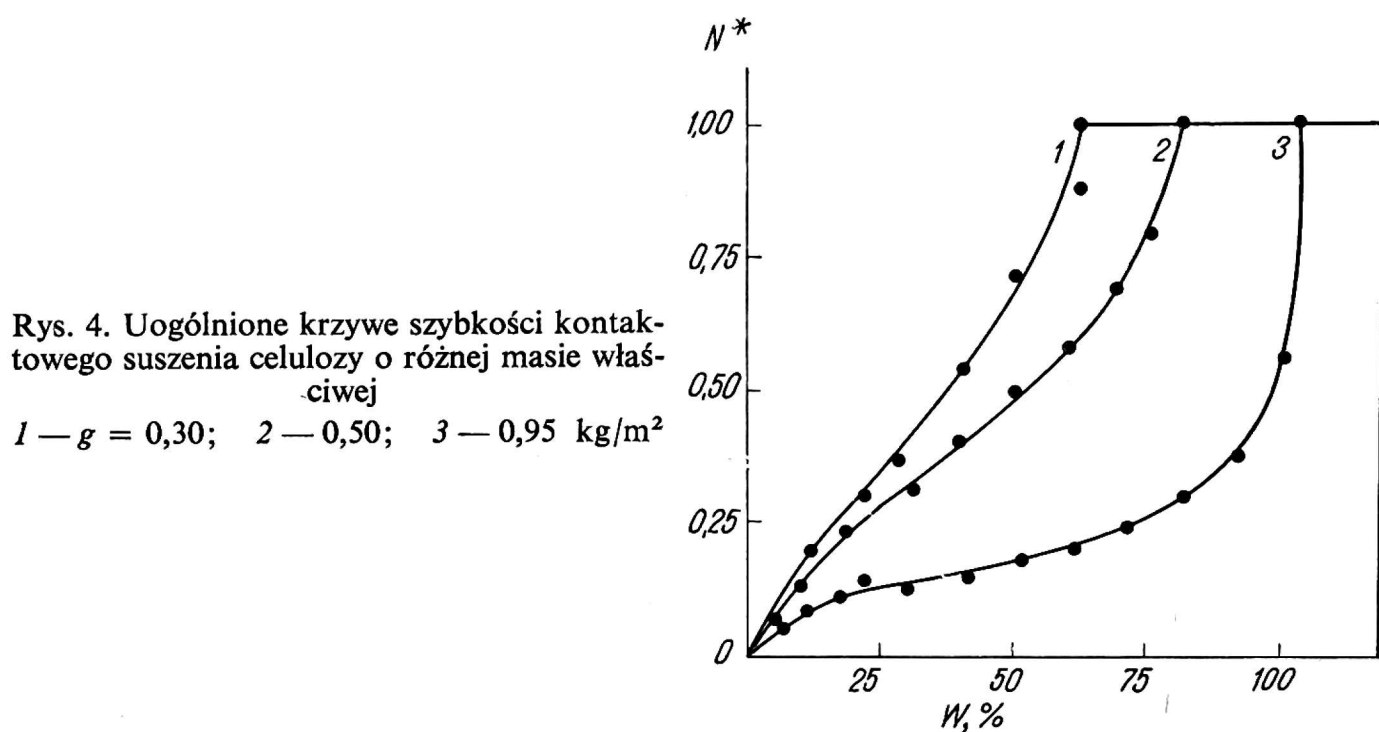
Zatem wielkość N^* nie zależy od warunków suszenia i dla konkretnego materiału, przy danej metodzie suszenia, jest tylko funkcją zawartości wody. Ten wniosek

wynika z metody uogólnienia krzywych suszenia, która pokrywa się z wywodami G. K. Fiłonienki dla zredukowanej szybkości suszenia [3].

Przeprowadzając graficzne różniczkowanie tylko jednej uogólnionej krzywej kinetyki suszenia, co można zrobić wystarczająco dokładnie, można otrzymać krzywą N^*-W , określoną jako uogólniona krzywa prędkości suszenia.

Na rysunku 4 są podane uogólnione krzywe szybkości kontaktowego suszenia celulozy o różnej masie właściwej. Te krzywe reprezentują wiele krzywych szybkości suszenia, odpowiadających różnym warunkom suszenia.

Analiza uogólnionych krzywych szybkości suszenia różnych materiałów wykazała, że większość krzywych w II okresie suszenia ma postać dwóch połączonych



Rys. 4. Uogólnione krzywe szybkości kontaktowego suszenia celulozy o różnej masie właściwej

1 — $g = 0,30$; 2 — $0,50$; 3 — $0,95 \text{ kg/m}^2$

odcinków krzywych wykładniczych, względnie krzywej wykładniczej i linii prostej, co w praktyce obejmuje wszystkie przypadki krzywych szybkości suszenia [1].

Z uogólnionych krzywych szybkości suszenia, przedstawionych na rysunku 5 widać, że mają one postać łamanej prostej, której złamanie zachodzi w punkcie drugiej krytycznej zawartości wody W_{kp2} . Prawo zmienności N^* przy przejściu z pierwszej części II okresu do drugiej zmienia się, co wskazuje na różnice w kinetyce i dynamice suszenia w różnych częściach II okresu.

Wielkości N_1^* w pierwszej i N_2^* w drugiej części II okresu w tym przypadku (rys. 5) oblicza się według następujących zależności empirycznych:

$$N_1^* = a'_0 \exp [a'_1(W - W_{kp2})], \quad (7)$$

$$N_2^* = a''_0 + a'_1(W - W_k). \quad (8)$$

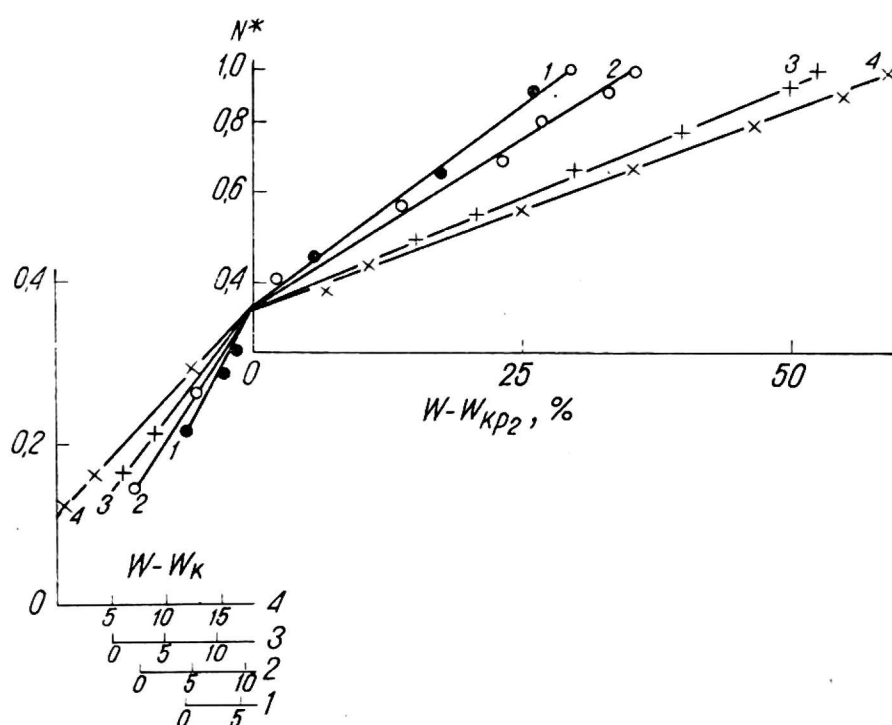
Współczynniki wchodzące do wzorów (7) i (8) łatwo wyznaczyć z uogólnionej krzywej szybkości suszenia we współrzędnych półlogarytmicznych i zwykłych. Przy tym zauważmy jeszcze raz, że w tym celu jest niezbędna tylko jedna doświadczalna

krzywa kinetyki suszenia, otrzymana przy każdych ustalonych warunkach. Wielkość współczynników zależy od właściwej masy, rodzaju materiału i metody suszenia.

Szybkość suszenia w każdym momencie drugiego okresu można określić znając wartość N w pierwszym okresie dla każdych warunków suszenia i wartość N^* dla danej zawartości wody (lub czasu suszenia) według wzoru:

$$\left| \frac{dW}{d\tau} \right| = N^*N. \quad (9)$$

Badanie procesu suszenia i opracowanie danych doświadczalnych, oparte na uogólnionych krzywych, pozwala przejść od pojedynczego konkretnego doświadczenia do ilościowych wyników wielu przypadków, odpowiadających różnym wa-



Rys. 5. Uogólnione krzywe szybkości kombinowanego suszenia celulozy
1 — $g = 0,05$; 2 — $0,10$; 3 — $0,2$; 4 — $0,3 \text{ kg/m}^2$

runkom suszenia bez potrzeby przeprowadzenia dodatkowych eksperymentów. Skracza to czas i zmniejsza środki niezbędne do doświadczalnego badania procesu suszenia danego materiału.

Proponowane analizy procesu suszenia i metody uogólniania wyników doświadczeń powinny być szczególnie owocne w tych gałęziach przemysłu i rolnictwa, gdzie suszeniu podlega duża ilość najróżnorodniejszych materiałów i produktów różniących się swoją budową i wymiarami, formami związków wody i właściwościami strukturalno-mechanicznymi. Metody uogólniania mogą być wykorzystane również przy badaniu dynamiki suszenia, a w szczególności przy analizie pól zawartości wody.

Przeprowadzona analiza kinetyki suszenia pozwoliła zaproponować cztery metody obliczania czasu suszenia. Pierwsza metoda oparta jest na korzystaniu z równań

kinetyki suszenia przy założeniu, że drugi okres składa się z dwóch części. Czas trwania suszenia według tej metody jest określany równaniem:

$$\tau_g = \frac{1}{N} \left(W_n - W_{kp_1} + \frac{1}{\chi_1} \ln \frac{W_{kp_1} - W_p}{W_{kp_2} - W_p} + \frac{1}{\chi_2} \ln \frac{W_{kp_2} - W_p}{W_k - W_p} \right). \quad (10)$$

Ta metoda obliczeń, będąc dalszym ciągiem rozwoju metody A. W. Łykowa, ma, jak wykazały przeprowadzone obliczenia, większą dokładność. W porównaniu z metodami A. W. Łykowa i G. K. Fiłonienki w proponowanej metodzie łatwiejsze jest znalezienie wchodzących w skład wzoru wielkości. Posługiwanie się tą metodą jest łatwiejsze. Wielkości W_{kp_1} i W_{kp_2} , χ_1 i χ_2 znajduje się bezpośrednio z uogólnionej krzywej suszenia wykreślonej we współrzędnych półlogarytmicznych.

Druga metoda obliczania czasu suszenia oparta jest na bezpośrednim wykorzystaniu uogólnionej krzywej suszenia we współrzędnych $W-N\tau$. Wzór obliczeniowy dla określenia czasu suszenia od dowolnej wartości W_n do danej końcowej W ma według tej metody postać:

$$\tau_g = \frac{1}{N} (W_n - W') = \frac{1}{N} \left[W_n + (N\tau)_W + W'_n \right], \quad (11)$$

gdzie W'_n — początkowa zawartość wody, przy której budowano uogólnioną krzywą suszenia.

Do wzoru obliczeniowego wchodzi pięć wielkości, dwie spośród nich (W_n , W) wynikają z założenia. N może być obliczona według znanych zależności, natomiast W'_n i $(N\tau)_W$ znajduje się na podstawie uogólnionej krzywej suszenia. Ta metoda obliczeń, w porównaniu z pierwszą, jest wygodniejsza i znacznie prostsza dla praktyki inżynierskiej przy dokładności takiej, jak w pierwszej metodzie.

Trzecia metoda obliczania czasu trwania suszenia proponuje wykorzystanie uogólnionej krzywej suszenia we współrzędnych $W-\tau/\tau_g$. Zgodnie z tą metodą, czas trwania procesu od W'_n do W'_k (przy tej zawartości wody budowano krzywą) określa się według jednej uogólnionej krzywej, przedstawionej w układzie W , τ lub na podstawie wartości N , jeżeli jest ona znana. W ostatnim przypadku, przyjmując dowolnie W w granicach I okresu, można znaleźć czas suszenia τ od W'_n do W , tj. według W i τ można określić czas trwania suszenia. Wzór obliczeniowy w tej metodzie ma postać

$$\tau_g = \frac{\tau}{\left(\frac{\tau}{\tau_g} \right)_w}, \quad (12)$$

gdzie wartość $(\tau/\tau_g)_w$ wyznacza się z uogólnionej krzywej suszenia, według doświadczalnych wartości W i τ .

Czwarta metoda jest oparta na stosowaniu uogólnionej krzywej suszenia we współrzędnych $W-K\tau$. Obliczenie czasu trwania wykonuje się według wzoru:

$$\tau_g = \frac{(K\tau)_w}{K}. \quad (13)$$

Wielkość $(K\tau)_w$ znajduje się z uogólnionej krzywej suszenia według zadanego W , dla którego przeprowadza się suszenie doświadczalne.

Wykorzystując prawo zachowania energii można otrzymać podstawowe równanie kinetyki suszenia [1], ustalające wzajemne powiązanie między wymianą ciepła i masy. W tym celu korzysta się z podstawowego kryterium kinetyki suszenia — liczby Rebindera, która określa zależność:

$$Rb = \frac{b\bar{c}}{r} = \frac{\bar{c}}{r} \left(\frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} \right), \quad (14)$$

gdzie $b = \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}}$ — współczynnik temperatury suszenia, będący funkcją zawartości wody.

Wielkość liczby Rb zależy od współczynnika temperatury suszenia, ciepła właściwego wilgotnego ciała \bar{c} i ciepła parowania wody r , a zatem od formy związku wody z wilgotnym materiałem.

Liczba Rebindera określa ilość ciepła używanego dla nagrzewania (ochłodzenia) suszonego materiału i na parowanie wody w ciągu nieskończonego małego okresu czasu.

Podstawowe równanie kinetyki suszenia ma postać:

$$q^* = \frac{q(\tau)}{q} = N^*(1 + Rb). \quad (15)$$

Z tego równania można, mając dane na temat wymiany masy, obliczyć proces wymiany ciepła przy suszeniu. Ponieważ wielkość N^* jest, jak ustalono, określana zależnością (7), (8), więc strumień ciepła $q(\tau)$ w każdym momencie czasu suszenia może być obliczony według równań:

$$\begin{aligned} q_1(\tau) &= \frac{grN}{100} a'_0 \exp[a'_1(W - W_{kp2})][1 + Rb], \\ q_2(\tau) &= \frac{grN}{100} [a''_0 + a''_1(W - W_k)][1 + Rb], \end{aligned} \quad (16)$$

gdzie g — masa 1 m² absolutnie suchego materiału.

Średnia (według objętości) temperatura materiału w procesie suszenia, odpowiadająca określonej wartości różniczkowej zawartości wody w danym momencie czasu suszenia może być obliczona na podstawie zależności $b = f(\bar{u})$:

$$t = \int b(\bar{u})d\bar{u} + C. \quad (17)$$

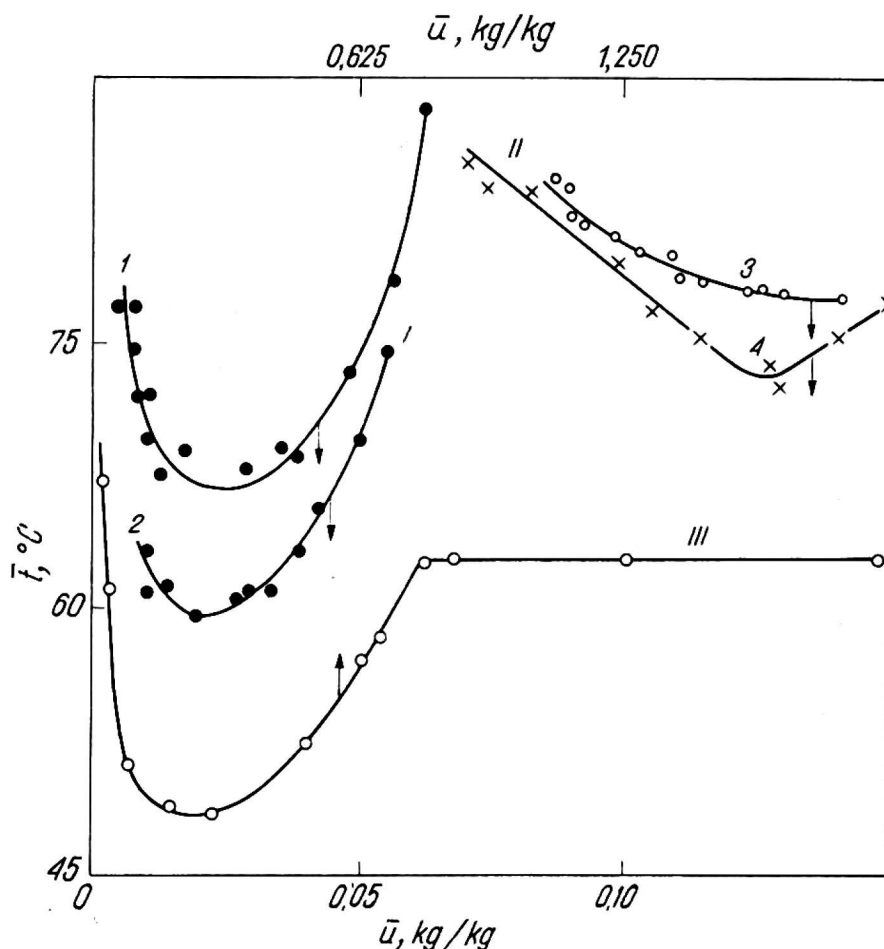
Dowolna stała C jest określana na podstawie warunków granicznych, szczególnie na podstawie średniej temperatury w I okresie.

W ten sposób dla obliczenia podstawowych wskaźników kinetyki wymiany ciepła, strumienia ciepła i średniej temperatury materiału trzeba znać zależność liczby Rebindera i współczynnika suszenia od zawartości wody. Te zależności można

otrzymać z doświadczenia lub z analitycznych rozwiązań równań całkowych wymiany ciepła i masy.

Eksperymentalne dane uzyskane przez autora i innych badaczy pól temperatury i kinetyki wymiany masy, przy kontaktowym suszeniu różnych materiałów, w różnych warunkach suszenia, pozwoliły przy odpowiedniej ich obróbce otrzymać zależność $\bar{t}-\bar{u}$ (rys. 6). Podobne zależności są podstawą dla obliczeń wielkości b i Rb .

Jak wykazała obróbka doświadczalnych danych kinetyka wymiany ciepła w II okresie jest określona za pomocą dwóch współczynników temperatury suszenia



Rys. 6. Zależność \bar{t} od \bar{u} dla różnych materiałów

I — piasek ($l = 20$ mm; $V_c = 61,5$ m/s; $t_c = 22^\circ\text{C}$); *I* — $t_{gr} = 110$; 2 = 90°C ; *II* — glina ognioodporna ($t_{gr} = 102^\circ\text{C}$; $t_c = 28^\circ\text{C}$; $V_c = 1,75$ m/s); 3 — $l = 26$; 4 = 10 mm, *III* — włókno szklane ($t_{gr} = 90^\circ\text{C}$; $l = 6,65$ mm)

i dwóch liczb Rebindera, charakterystycznych dla pierwszej i drugiej części okresu. Zależności tych charakterystyk od zawartości wody w obu częściach okresu są różne co do charakteru, a podczas suszenia kontaktowego wielkości b i Rb różnią się znakiem (b_1 i Rb_1 są ujemne, b_2 i Rb_2 — dodatnie) w obu częściach okresu.

Doświadczalne dane dla współczynników b przy kontaktowym suszeniu różnych materiałów (CSM, celuloza, glina, piasek, włókno szklane) są aproksymowane za pomocą następujących zależności:

a) w pierwszej części drugiego okresu

$$b_1 = b_{01}(\bar{u} - \bar{u}_{kp2}) \quad (18)$$

lub

$$b_1 = \text{const}, \quad (19)$$

b) w drugiej części drugiego okresu

$$b_2 = b_{02}(\bar{u}_{kp2} - \bar{u})^{n''}. \quad (20)$$

Wielkość b_{01} zawsze jest o wiele mniejsza od b_{02} , n'' zmienia się od 1,00 (piasek, glina) do 3,13 (włókno szklane). Wraz ze wzrostem temperatury powierzchni grzejącej wartości b_{01} i b_{02} nieco wzrastają. Pomimo to wartość b_{02} zależy od właściwej masy materiału. Wykładnik n'' (20) zależy tylko od grubości danego materiału, przy czym wzrasta on wraz z jej zmniejszaniem się. Tak więc, wielkości b_1 i b_2 zależą także i od parametrów procesu suszenia.

Zależności $Rb = f(\bar{u})$ mają dla kapilarno-porowatych koloidalnych ciał, np. (SCM) i celulozy postać:

$$Rb_1 = D_1(\bar{u} - u_{kp2})^{n_1}, \quad (21)$$

$$Rb_2 = D_2(\bar{u}_{kp2} - \bar{u})^{n_2}. \quad (22)$$

Wielkość n_1 jak wykazało opracowanie doświadczalnych danych nie zależy od warunków suszenia i właściwej masy materiału, zależy natomiast od jego rodzaju (dla celulozy $n_1 = 0,25$, dla SCM — 0,38). Wskaźnik stopnia n_2 nie zależy od t_{gr} , natomiast zmniejsza się wraz ze wzrostem g (dla SCM równa się 1,69). Wielkości D_1 i D_2 zależą od t_{gr} i g .

Zależności $Rb = f(\bar{u})$ dla kapilarno-porowatych ciał (piasek, włókno szklane) będą następujące:

$$Rb_1 = D'_1(\bar{u} - \bar{u}_{kp2}), \quad (23)$$

$$Rb_2 = D'_2(\bar{u}_{kp2} - \bar{u}), \quad (24)$$

gdzie wielkości D'_1 i D'_2 zależą od warunków suszenia.

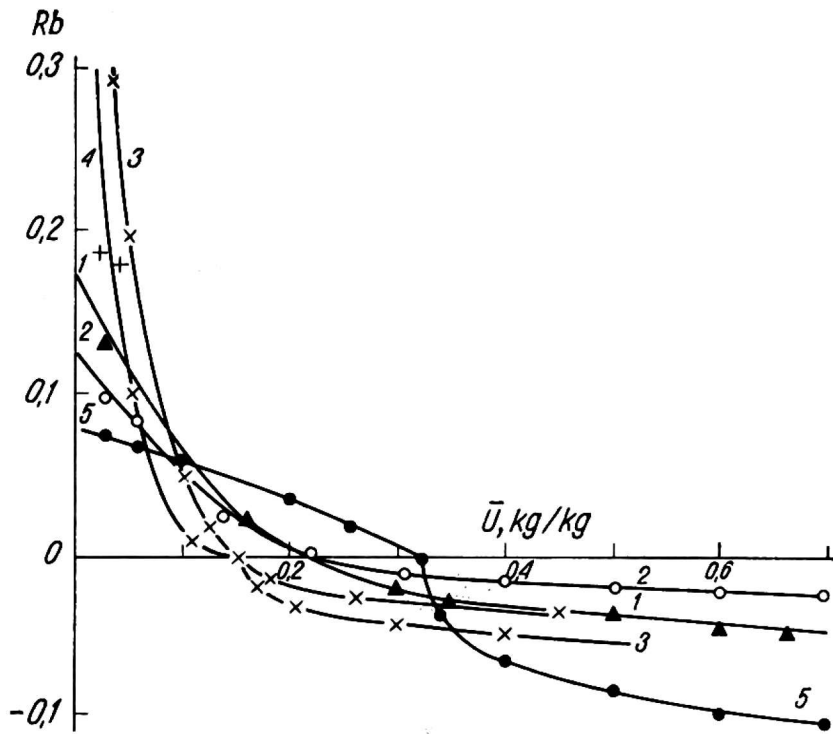
Różnice w charakterze zależności liczb Rb od zawartości wody dla ciał koloidalnych kapilarno-porowatych oraz kapilarno-porowatych tłumaczy się różnicą form związku wody w tych materiałach.

Ilościowy i jakościowy charakter zmiany liczb Rb w procesie kondukcyjnego suszenia koloidalnych kapilarno-porowatych i kapilarno-porowatych materiałów pokazano odpowiednio na rysunku 7 i 8.

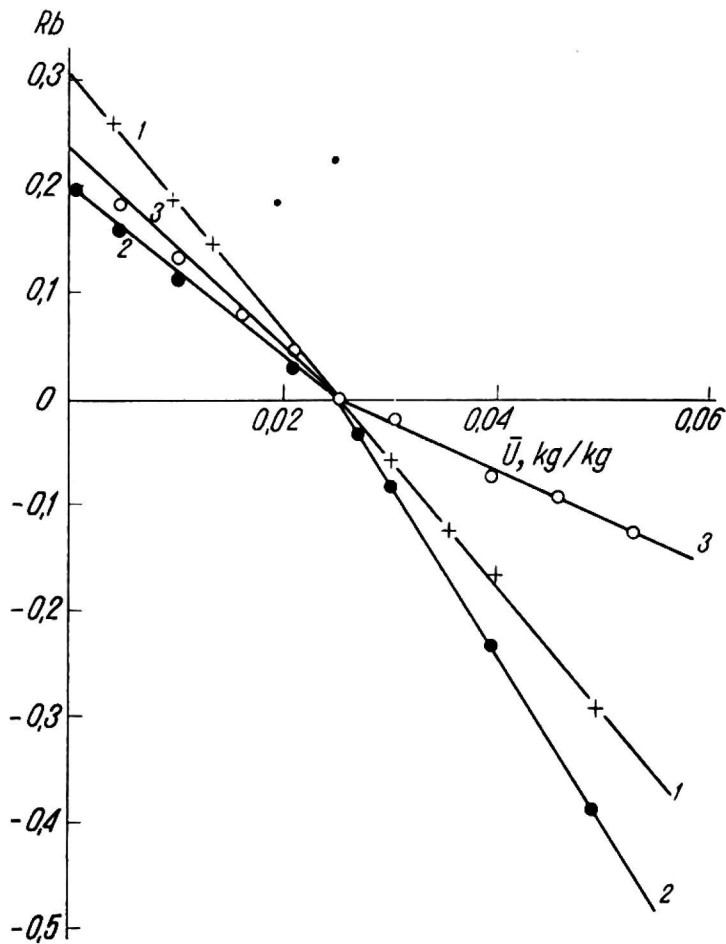
Krzywe są wykreślone według równań dla odpowiednich Rb , a punkty odpowiadają danym doświadczalnym. Jak widać, wraz ze zmniejszeniem się u wielkość liczby Rb wzrasta, przy tym dla ciał koloidalnych kapilarno-porowatych jest większa niż dla ciał kapilarno-porowatych.

Jak wynika z rysunków, wielkości Rb również nieco zależą od parametrów procesu suszenia. Wraz ze wzrostem temperatury powietrza opływającego powierzchnię piasku wartość Rb_1 szybko się zmniejsza (rys. 8), natomiast wartość Rb_2 wzrasta. Zmiana wartości Rb_2 odbywa się wolniej niż Rb_1 .

Wielkości liczby Rb_2 świadczą o konieczności przerwania procesu suszenia kondukcyjnego po osiągnięciu wymaganej końcowej zawartości wody. Przesuszenie



Rys. 7. Zmiana liczby Rebindera (Rb) przy kontaktowym suszeniu SCM (1, 2) i celulozy (3, 4, 5) w zależności od \bar{u} (kg/kg) przy różnych temperaturach powierzchni grzejnej (t_{gr})
 1 — $t_{gr} = 100^{\circ}\text{C}$; 2 = 80; 3 = 116 ($0,3 \text{ kg/m}^2$); 4 = 100 ($0,1 \text{ kg/m}^2$); 5 = 103 (1,5 mm)



Rys. 8. Zależność liczby Rebindera (Rb) przy kontaktowym suszeniu warstwy piasku o grubości 20 mm od \bar{u} (kg/kg) w różnych temperaturach powierzchni grzejnej (t_{gr}) oraz przy przepływie powietrza (t_c) z prędkością 1,5 m/s
 1 — $t_{gr} = 110^{\circ}\text{C}$, $t_c = 23^{\circ}\text{C}$; 2 — odpowiednio 90 i 23; 3 — 90 i 90

bowiem materiału, obok wywoływania jego zmian technologicznych, prowadzi również do nadmiernego zużycia energii, ponieważ Rb_2 szybko wzrasta w miarę zmniejszania się \bar{u} .

Podstawowe równanie kinetyki suszenia z uwzględnieniem znaku liczby będzie następujące:

dla pierwszej części II okresu kontaktowego suszenia

$$q_1 = N_1^*(1 - Rb_1), \quad (25)$$

dla drugiej części drugiego okresu

$$q_2 = N_2^*(1 + Rb_2). \quad (26)$$

Jeżeli na początku pierwszej części II okresu gęstość strumienia ciepła doprowadzanego do materiału wynosi 95% gęstości strumienia ciepła, zużytego na parowanie (liczba $Rb_1 = 0,05$), to 5% ciepła zużytego na parowanie bierze się bezpośrednio od materiału na koszt akumulowanego przez niego ciepła, w rezultacie czego temperatura materiału obniża się. Jeżeli np. $Rb_2 = 0,13$, to materiał pochłania ciepło, które zostało zużyte na parowanie i nagrzewanie, przy tym 13% ciepła zużytego na parowanie traci się na nagrzewanie materiału.

Równania (25) i (26) razem z otrzymanymi zależnościami $Rb = f(\bar{u})$ pozwalają określić gęstość prądu ciepła* doprowadzonego do materiału, nawet w wypadkach skomplikowanej wymiany ciepła w każdym momencie czasu procesu. Taki sposób obliczania $q(\tau)$ pozwolił zrezygnować ze współczynnika wnikania ciepła $\alpha(\tau)$ i umożliwił przy formułowaniu zadań suszenia pominięcie granicznych warunków 3 rodzaju oraz zastąpienie ich granicznymi warunkami 2 rodzaju.

Po przeprowadzeniu całkowania (17) i wykorzystaniu przy tym równań (18)-(20) oraz określeniu stałej całkowania, można otrzymać równania dla określenia średniej temperatury materiału w każdym momencie II okresu suszenia. Wyniki obliczeń dla wypadków, kiedy b jest stałe lub zmienia się liniowo, dobrze się zgadzają z danymi doświadczalnymi. Potwierdzeniem tego są krzywe pokazane na rysunku 6, zbudowane według otrzymanych równań dla \bar{t} , na których punkty odpowiadają danym doświadczalnym.

Zaproponowane metody analizy i obliczeń kinetyki wymiany ciepła i masy przy suszeniu wilgotnych materiałów nadają się szczególnie do wykorzystania bezpośrednio przy badaniu procesu suszenia w praktyce i w technologii oraz w obliczeniach urządzeń suszarniczych. Mogą one z powodzeniem także być stosowane w analitycznej teorii przenoszenia wody i ciepła w materiałach przy suszeniu.

LITERATURA

1. Łykow A. W.: Teoria suszenia. Energia. Moskwa 1968.
2. Krasnikow W. W., Daniłow W. A.: IFŻ, 1966, t. II, nr 4.
3. Filonienko G. K., Kossek W. K.: Przenoszenie ciepła i masy, t. 5, Energia, Moskwa—Leningrad 1966.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА КИНЕТИКИ СУШКИ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. В. КРАСНИКОВ — СССР

Резюме

Анализ многих экспериментальных данных по кинетике сушки различных материалов (зерно, овощи, виноградные семена, листовые волокнистые материалы — ткани, бумаги, картон, химические продукты, торф и др.) разными методами сушки (конвективным, кондуктивным, комбинированным, инфракрасными лучами, в кипящем слое), полученных советскими и зарубежными авторами, позволил сформулировать следующую гипотезу: при сушке данным методом конкретного материала, имеющего определенное начальное влагосодержание, при любом режиме сушки сохраняется неизменной величина, отвечающая данному текущему влагосодержанию и равная произведению скорости сушки в первый период при различных режимах на время сушки до данного текущего влагосодержания.

Тогда все экспериментальные кривые сушки данного материала при различных режимах (семейство кривых) при одном и том же начальном влагосодержании, перенесенные в новую систему координат, совмещаются в единую кривую, названную обобщенной кривой кинетики сушки.

Используя гипотезу, можно предложить и другие методы обобщения кривых сушки, основанные на постоянстве в процессе сушки той или другой величины.

Установленная инвариантность ряда величины для данного влагосодержания при сушке независимо от режима позволила предложить как методы обобщения кривых сушки, так и кривых скорости сушки, а также создать четыре метода расчета длительности сушки.

Изучение сушки и обработка опытных данных, основанные на обобщенных кривых, позволяют перейти от единичного конкретного опыта к количественным результатам множества случаев, отвечающих различным режимам сушки без проведения дополнительных экспериментов. Это сокращает время и средства, необходимые для опытного исследования процесса сушки данного материала.

Величина относительной скорости сушки, определяемая непосредственно из обобщенной кривой сушки, не зависит от режима сушки и для конкретного материала при данном методе сушки является лишь функцией влагосодержания.

Анализ обобщенных кривых скорости сушки для различных материалов показал, что эти кривые во второй период сушки представляются двумя сопряженными участками либо экспонент, либо экспоненты и прямой.

Получены экспериментальные зависимости, определяющие кинетику теплообмена применительно к кондуктивной сушке (плотность потока тепла и средняя температура материала в процессе сушки).

Как показала обработка опытных данных, кинетика теплообмена во второй период определяется двумя температурными коэффициентами сушки и двумя числами Ребиндера, характерными для первой и второй частей периода. Эти величины в обеих частях периода различны по величине, а при кондуктивной сушке — и по знаку.

Приведены выражения температурных коэффициентов сушки и чисел Ребиндера в зависимости от влагосодержания при различных режимах для двух частей второго периода сушки капиллярнопористых коллоидальных и капиллярнопористых тел.

Предложенные методы анализа и расчета кинетики сушки влажных материалов помимо использования их непосредственно при исследовании сушки, в ее практике, и в технологии сушки, расчетах сушильных устройств могут успешно применяться в аналитической теории переноса влаги и тепла при сушке.

THE CALCULATION METHODS OF THE KINETICS OF MOIST MATERIAL DRYING

V. V. KRASNIKOV — USSR

S u m m a r y

The analysis of many experimental data on the kinetics of drying of different materials (grain, vegetables, grape seeds, sheet fibrous materials-fabrics, paper, cardboard, chemical products, peat etc.) by different drying methods (convective, conductive, combined, by infra-red rays, in a boiling layer) obtained by the Soviet and foreign authors allowed to make the following hypothesis: if a given method of drying is applied to a specific material having a certain initial moisture content, then at any drying regime the value corresponding to the given current moisture content and equal to the product of the speed of drying the first period under the different regimes by the time of drying up till the given current moisture content is constant.

Then all the experimental drying curves of a given material for different regimes (a family of curves) with the same initial moisture content transferred to a new system of coordinates are combined into a single curve called a generalized curve of kinetics of drying.

Applying this hypothesis to other methods of drying a generalization of curves based on the stability of any value during drying process can be suggested.

Established invariance of an number of values for a given moisture content during drying irrespectively of the regime has allowed to suggest both the methods of generalization of drying curves and the curves of the rate of drying and also to create four methods of calculation of the time of drying.

The study of drying and the experimental data treatment based on the generalized curves allow to pass from a single specific experiment to the quantitative results of many cases corresponding to different drying regimes without carrying out additional experiments. It cuts down the expenses and reduces the time which are necessary for the experimental research of the process of a given material drying.

The value of the relative rate of drying calculated directly from the drying curve generalization doesn't depend on the drying regime and it is only a function of the moisture content for a certain specific material under the given drying method.

The analysis of the generalized curves of the rate of drying for different materials showed these curves to be represented by two conjugated parts either exponent or exponents and the straight line during the second drying period.

The experimental dependences determining the heat transfer kinetics applied to the conductive drying (the density of the heat stream and a mean material temperature during the drying process) are obtained.

The treatment of the experimental data showed that the heat transfer kinetics during the second period is determined by two temperature drying coefficients and by two Rebinder numbers which characterize the first and the second parts of the period. These values in both parts of the period are different and for the conductive drying they have different signs.

The expressions of the temperature drying coefficients and Rebinder numbers in dependence on the moisture content under different regimes for two parts of the second drying period of the colloidal capillary porous and capillary porous bodies are given.

The suggested methods of analysis and calculation of the drying kinetics of moist materials besides their application directly for the research of drying, the drying practice for and the drying technology, drying arrangements designing can be successfully applied for the analytical theory of the moisture and heat transfer during drying.

DIE METHODEN DER BERECHNUNG UND TROCKNUNGSKINETIK
DER FEUCHTEMATERIALEN

W. W. KRASNIKOW — UdSSR

Z u s a m m e n f a s s u n g

Die Analyse der vielen experimentalen Angaben in der Gegend der Trocknungskinetik der verschiedenen Materialien (Korn, Gemüse, Weinbaumsamen, Faserbogenmaterialen, Webstoffe, Papier, Karton, chemische Produkte, Torf u.a.) mit verschiedenen Trocknungsmethoden (konvektive, konduktive, kombinierte mit ultraroten Strahlen, in der siedenden Schicht), die von den sowjetischen und ausländischen Verfassern hergekommen sind, erlaubte auf die Formulierung folgender Hypothese: bei der Trocknung mit der angegebenen Methode des konkreten Materials, welches den bestimmten Anfangswassergehalt hat, bei dem willkürlichen Regim der Trocknung, bewährt sich die unveränderliche Grösse, die dem laufenden Wassergehalt entspricht und gleich dem Produkt der Trocknungsgeschwindigkeit in der ersten Phase bei verschiedenen Regimen durch die Trocknungszeit bis zum Moment der Erreichung dieses laufenden Wassergehaltes ist.

Dann alle experimentalen Trocknungskurven des angegebenen Materials bei verschiedenen Regimen (Kurvenfamilie), bei demselben Wassergehalt, übertragene zur neuen Beiordnunganlage, tragen sich in eine Kurve auf, die sich verallgemeinere Kurve der Trocknungskinetik nennt.

In Ausnutzen dieser Hypothese kann man auch andere Methoden der Verallgemeinerung der Trocknungskurven auf Grund der Unveränderlichkeit dieser oder jener Grösse in dem Trocknungsverfahren vorschlagen.

Die festgestellte Unveränderlichkeit einiger Grössen für den angegebenen Wassergehalt bei Trocknung, unabhängig vom Regim ermöglichte so die Methoden der Verallgemeinerung der Trocknungskurven, wie auch der Trocknungsgeschwindigkeitskurven vorschlagen und vier Methoden der Berechnung der Trocknungszeit zu bilden.

Die Untersuchung der Trocknung und die Bearbeitung der Experimentalangaben, die sich auf den verallgemeinerten Kurven stützten, erlauben den Übergang vom einzelnen konkreten Experiment zu den Zahlenresultaten der mehreren Fällen, die den verschiedenen Regimen entsprechen, ohne die zusätzliche Experimente durchzuführen. So verkürzt sich die Zeit und vermindern sich die Anlagen, die für die Durchführung des Experimenten des Trocknungsverfahrens des angegebenen Materials nötig sind.

Die relative Trocknungsgeschwindigkeit, die direkt von der verallgemeinerten Kurve bestimmt wird, ist von dem Trocknungsregim nicht abhängig. Sie ist für das konkrete Material bei der angegebenen Trocknungsmethode nur die Funktion des Wassergehaltes.

Die Analyse der verallgemeinerten Trocknungsgeschwindigkeitskurven für die verschiedenen Materialien hat gezeigt, dass diese Kurven in der zweiten Phase der Trocknung zwei verbundene Abschnitte entweder der Exponentkurven oder einer Exponentkurve und einer Geraden darstellen.

Man bekommt die experimentalen Abhängigkeiten, die die Wärmetauschkinetik für die konduktive Trocknung bezeichnen (die Dichtigkeit des Wärmestromes und die Mitteltemperatur des Materials in dem Trocknungsverfahren).

Wie es die Bearbeitung der experimentalen Angaben gezeigt hat, die Wärmetauschkinetik in der zweiten Phase wird mit zwei Trocknungstemperaturkoeffizienten und zwei Rebinden-Zahlen bestimmt, die für den ersten und zweiten Teil der Trocknung charakteristisch sind. Diese Werten sind in beiden Teilen der Phase anders wegen der Grösse, dagegen bei der konvektiven Trocknungsmethode auch wegen des Zeichens.

Man hat die Formeln für die Trocknungstemperaturkoeffiziente und Rebider-Zahlen in der Abhängigkeit vom Wassergehalt bei verschiedenen Regimen für zwei Teilen der zweiten Phase der Trocknung für die Kapilar-porös-Kolloidalen und Kapilarporösen Körper angegeben.

Die vorgeschlagenen Methoden der Analyse und der Berechnung der Trocknungskinetik der Feuchtenmaterialien ausser der Ausnutzung direkt bei der Untersuchung, in der Praxis und in der Technologie der Trocknung, wie auch in der Berechnung der Trocknungsanlagen, können auch in der analytischen Theorie der Wasser- und Wärmeübertragung in der Trocknung Anwendung finden.