

# KÉTRÉTEGŰ ANYAGOK SZAKASZOS, KONVEKCIÓS SZÁRÍTÁSA

MOLNÁR KÁROLY\*

[Beérkezett 1975. április 25-én]

A dolgozat kétrétegű anyagok száradásának mechanizmusát vizsgálja. A vizsgálat célja, egy a száradás sebességét csökkentő száraz makrokapilláris réteg hatásának számbavétele a száradás folyamatában. A felállított matematikai modell numerikus megoldásával a száraz réteg hatása követhető. Megállapítható, hogy egy kezdeti kialakulási időszak után létrejön egy stacioner állapot. A dolgozat meghatározza a kialakuló egyensúlyi állapot jellemzőit, és az azt befolyásoló tényezőket. A számítási módszert számpélda illusztrálja.

## Jelölések

$a$	— hőfokvezetési tényező, $m^2/h$
$a_m$	— nedvességvezetési tényező, $m^2/h$
$c$	— fajhő, $kcal/kg\ ^\circ C$
$D$	— diffúziós tényező, $m^2/h$
$j_m$	— nedvesség anyagárama, $kg/m^2\ h$
$K$	— hőátbocsátási tényező, $kcal/m^2\ h\ ^\circ C$
$K_G$	— anyagátbocsátási tényező, $kg/m^2\ h\ at$
$K_G^*$	— moláris anyagátbocsátási tényező, $kmol/m^2\ h\ at$
$k$	— hővezetési tényező, $kcal/m\ h\ ^\circ C$
$k_G^*$	— anyagátadási tényező, $kmol/m^2\ h\ at$
$k_m$	— anyagvezetési tényező, $kg/m\ h\ at$
$L$	— vastagság, $m$
$M$	— molekulaszám, $kg/kmol$
$m$	— vízgőz tenziógörbéjének iránytangense, $at/^\circ C$
$P$	— össznyomás, $at$
$p$	— parciális nyomás, $at$
$q$	— hőáram-sűrűség, $kcal/m^2\ h$
$R$	— univerzális gázállandó, $at\ m^3/kmol\ ^\circ K$
$r$	— fázisváltási hő, $kcal/kg$
$T$	— hőmérséklet, $^\circ K$
$t$	— hőmérséklet, $^\circ C$
$u$	— nedvességtartalom, $kg/kg$
$z$	— hely koordináta, $m$
$\alpha$	— hőátadási tényező, $kcal/m^2\ h\ ^\circ C$
$\delta$	— hőmérsékletgradiens tényező, $kg/kg\ ^\circ C$
$\varepsilon$	— fázisváltási kritérium
$\lambda$	— állandó
$\xi$	— vastagság, $m$
$\rho$	— sűrűség, $kg/m^3$
$\mu_0$	— diffúziós ellenállás faktor
$\tau$	— idő, $h$
$\Theta$	— fázishatárfelület hőmérséklete, $^\circ C$

\* Molnár Károly, 1125 Budapest, György A. u. 13.

## Indexek

$AB$	— $A$ komponens $B$ -be történő diffúziójára vonatkozó
$\text{áll}$	— állandósult érték
$c$	— koncentráció különbség hajtóerőre vonatkozó
$e$	— egyensúlyi érték
$\text{eff}$	— effektív
$F$	— gáz és szilárd fázis határfelületére vonatkozó
$G$	— gázfázis főtömegére vonatkozó
$g$	— gőzfázisra vonatkozó
$H$	— hőátadásra vonatkozó
$hp$	— harmatpontra vonatkozó
$i$	— hely koordináta
$k$	— idő koordináta
$kr$	— kritikus nedvességtartalom
$kv$	— konvekció
$L$	— levegőre vonatkozó
$m$	— anyagra vonatkozó
$n, nL$	— nedves hőmérő hőmérsékletre vonatkozó
$o$	— kezdeti érték
$\bar{o}$	— összes
$p$	— állandó nyomásra vonatkozó
$pWG$	— vízgőzre vonatkozó
$t$	— telítési érték
$W$	— vízgőzre vonatkozó
$I$	— I-es száraz rétegre vonatkozó
$II$	— II-es rétegre vonatkozó
$\prime$	— ekvimoláris szembediffúzióra vonatkozó
$\xi$	— a száraz és a nedves szilárd fázis határfelületére vonatkozó

## I. Bevezetés

Az iparban előforduló szárítási feladatok egy speciális fajtája az ún. két-rétegű anyagok szárítása. Ilyen esetekben a szárítandó anyag felszíne nem érintkezik közvetlenül a szárítólevegővel, hanem egy közbülső, a szárítandó anyag és a szárítólevegő között elhelyezkedő réteg felszínével. Sok esetben mindkét réteg tartalmaz nedvességet, és a szárítás folyamán mindkettőből el kell azt távolítani. Ilyen feladat pl. a répamag-drazsés szárítása, amikor is a répamagot egy földburokkal veszik körül, és ezt a *drazsét* kell egy olyan nedvességtartalomra kiszárítani, amelynél a legkedvezőbbek a tárolási és csírázási tulajdonságok. Makroporozus ágyak szárításakor, amikor a száradó front az anyagba húzódik, szintén létrejön a szárítás folyamán ez a kettős réteg. Ilyen esetekben csak a szárítólevegővel közvetlenül nem érintkező szilárd réteg tartalmaz nedvességet. Ilyen kettős réteget létrehozhatunk abból a célból is, hogy adott szárítólevegő állapotjelzők mellett egy szárítandó anyag maximálisan megengedhető száradási sebességét egy felső száraz réteg alkalmazásával biztosítsuk, és így kíméletes szárítási viszonyokat hozunk létre.

Durva és finom szemcseméretű homokból képezett kétrétegű ágy szárítását vizsgálva LIKOV [1] megállapította, hogy ha a durva homok érintkezett a szárítólevegővel, akkor kezdetben csak a durva réteg száradt, és a finom

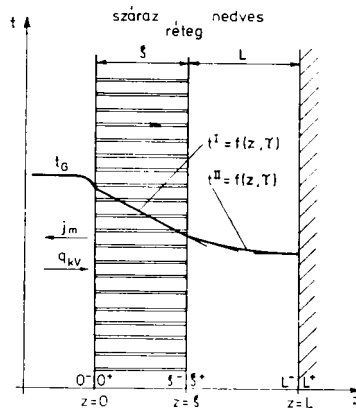
szemcseméretű réteg száradása gyakorlatilag csak a felső durva réteg száradásának befejezése után indul meg.

Ez azzal magyarázható, hogy ha a goromba homok kapilláris potenciálja lényegesen kisebb, mint a finom homoké, ezért a nedvesség nem vándorol az alsó rétegből a felsőbe. Fordított esetben a finom homokréteg állandó önfel szívással biztosítja a nedvesség utánpótlást és így nem jön létre egy száraz réteg, amely a száradás szempontjából diffúziós gátat jelent a gőz eltávolításának.

A dolgozatban olyan esettel foglalkozunk, amikor a szárítandó anyag és a szárítólevegő között egy száraz makrokapilláris réteg helyezkedik el, amelynek kapilláris potenciálja lényegesen kisebb, mint a szárítandó nedves anyagé. A nedvesség elpárolgása a két réteg határfelületén történik, az elpárolgott gőz a felső száraz réteg makrokapillárisain keresztül diffúzióval jut a szárítólevegőbe. A dolgozatban a szárítás kialakulási és ún. állandó sebességű szakaszával foglalkozunk.

## 2. Matematikai modell

Vizsgáljuk egy  $L$  vastagságú, végtelen felületű, alul tökéletesen szigetelt síklap száradását, ha azt egy  $\xi$  vastagságú makroporozus száraz réteg választja el a szárítólevegőtől. A szárítógáz főtömegének állapotjelzői, a  $t_G$  hőmérséklet,  $P$  össznyomás, a nedvesség  $pw_G$  parciális nyomása, és a gáz  $w_G$  áramlási sebessége állandó. A nedves anyag és a felső réteg kezdetben mindennél  $t_0$  hőmérsékletű. A vizsgált modell az 1. ábrán látható.



1. ábra. Kétrétegű modell száradási mechanizmusa

A nedves anyagon belül az anyag hőmérsékletváltozását és nedvességtartalom változását leíró differenciálegyenlet-rendszer [2]:

$$\frac{\partial t_{II}}{\partial \tau} = a_{II} \frac{\partial^2 t_{II}}{\partial z^2} + \varepsilon \frac{r}{c_h} \frac{\partial u}{\partial \tau},$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 t_{II}}{\partial z^2}.$$

Amennyiben a nedves anyagon belül csak folyadékfázisú diffúziót tételezünk fel, úgy a fázisváltózási kritérium értéke zérus [10], azaz

$$\varepsilon = \frac{j_{mg}}{j_m} = 0.$$

Továbbá feltételezve, hogy a szorpciós izoterma és a kapilláris potenciál a vizsgált tartományban nem hőmérséklet függő [10], így az  $a_m \delta = 0$ , így a differenciálegyenlet-rendszer a következő lesz:

$$\frac{\partial t_{II}}{\partial \tau} = a_{II} \frac{\partial^2 t_{II}}{\partial z^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (2)$$

### 2.1. Az egyértelműségi egyenletek

A kezdeti feltétel:

$$t_{II}(z, 0) = t_0 = \text{áll}, \quad (3)$$

$$u(z, 0) = u_0 = \text{áll}. \quad (4)$$

A nedves anyag alja tökéletesen szigetelt, ezért ott a hő- és anyagáram sebessége zérus, ezért a peremfeltétel

$z = L$  helyén:

$$\left. \frac{\partial t_{II}}{\partial z} \right|_{z=L^-} = 0, \quad (5)$$

és

$$\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=L^-} = 0. \quad (6)$$

A két réteg határfelületén, a  $z = \xi$  helyen történik a párolgás, ezért a határfelület egységére időegység alatt belépő hőmennyiség egy része a nedvesség elpárologtatásához szükséges, további része a nedves anyag entalpiáját növeli.

Tehát a  $z = \xi$  helyen:

$$k_1 \frac{\partial t_1}{\partial z} \Big|_{z=\xi^-} = k_{11} \frac{\partial t_{11}}{\partial z} \Big|_{z=\xi^+} - j_m r \quad (7)$$

és

$$k_m \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=\xi^+} = j_m. \quad (8)$$

Az I jelű száraz réteg elemi entalpiamérlegében figyelembe kell venni a két szilárdfázis határfelületén elpárolgó nedvesség entalpiájának megváltozását is, így az I szilárdfázisban

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} + \frac{c_{pwG}}{c_1 \rho_1} \frac{\partial t_1}{\partial z} j_m. \quad (9)$$

A (9) differenciálegyenlet egyértelműségi feltételei:

Kezdeti feltétel:

$$t_1(z, 0) = t_0 = \text{áll.} \quad (10)$$

A száraz réteg felszíne a szárítólevegővel érintkezik, így a határfeltétel  $z = 0$  helyen:

$$\alpha_G(t_G - t_F) = -k_1 \frac{\partial t_1}{\partial z} \Big|_{z=0^+}. \quad (11)$$

A száraz és a nedves réteg határfelületén a (7) egyenlettel már megadtuk a határfeltételt.

## 2.2. A száradási sebesség

Száradási sebességen a száradó anyag egységnyi felületéről időegység alatt elpárolgó nedvesség tömegét értjük. A száradási sebesség a szárítólevegő állapotjelzőivel képezett hajtóerővel kifejezve:

$$j_m = k_G M_w (p_{wF} - p_{wG}). \quad (12)$$

A (12) egyenletben a  $p_{wF}$  jelenti a szárítólevegővel érintkező szilárd réteg felszínének hőmérsékletéhez tartozó egyensúlyi vízgőz parciális nyomását. Miután a felszín hőmérséklete a szárítás folyamán változik, így a szárítási sebesség is.

A (12) egyenlettel definiált vízgőz tömeg a száraz réteg kapillárisain keresztül diffúzióval jut a felszínre.

Amennyiben a molekulák szabad úthossza a makrokapilláris jellemző méreténél kisebb, akkor jelentős szerepe van a molekulák egymáshoz való ütközésének. Ebben az esetben a diffúzió az ún. molekuláris diffúzió lesz.

Kapillár-pórusos anyagokban létrejövő molekuláris diffúzió esetén a diffúzió úthossza és az áramlási keresztmetszet változik. Ezért ilyen esetekre KRISCHER [3, 4] egy effektív diffúziós tényező bevezetését javasolta,

$$D_e = \frac{D_{AB}}{\mu_D}, \quad (13)$$

ahol  $D_{AB}$  a vízgőz diffúziós tényezője levegőben szabad állapotban, és  $\mu_D$  az ún. diffúziós ellenállás faktor. Hasonló módon az effektív diffúziós tényező alkalmazását javasolja számos szerző [5, 6, 7, 8].

A diffúziós anyagáram az effektív diffúziós tényező alkalmazásával

$$j_m = \frac{D_e}{RT} M_w \frac{dp_w}{dz},$$

illetve az integrált alak:

$$j_m = \frac{D_e}{RT} \frac{M_w}{\xi} (p_{w\xi} - p_{wF}). \quad (14)$$

A (12) és (14) egyenletek alapján a száradás sebessége:

$$j_m = \frac{1}{\frac{1}{k_G M_w} + \xi \frac{RT}{D_e M_w}} (p_{w\xi} - p_{wG}). \quad (15)$$

Bevezetve a következő jelölést

$$K_G = \frac{1}{\frac{1}{k_G M_w} + \xi \frac{RT}{D_e M_w}}, \quad (16)$$

a száradási sebesség

$$j_m = K_G (p_{w\xi} - p_{wG}).$$

A száradás folyamán tekintsük az egyensúlyi (tenzió-) görbét egy  $m$  iránytangensű egyenesnek, akkor

$$p_{w\xi} - p_{wG} = m(t_\xi - t_{hp}). \quad (17)$$

A (15), (16) és (17) alkalmazásával a szárítás folyamatát leíró kapcsolt, parciális differenciálegyenlet-rendszer a következő lesz:

a) az I. rész

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1}{\partial z^2} + \frac{c_{pwG}}{c_1 \rho_1} m K_G (t_\xi - t_{hp}) \frac{\partial t_1}{\partial z}. \quad (9.a)$$

b) a II. rész

$$\frac{\partial t_{II}}{\partial \tau} = a_{II} \frac{\partial^2 t_{II}}{\partial z^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (2)$$

c) az egyértelműségi feltételek  
kezdeti feltétel

$$\begin{aligned} t_I(z, 0) &= t_0, \\ t_{II}(z, 0) &= t_0, \\ u(z, 0) &= u_0, \end{aligned} \quad (3)$$

határfeltételek

$z = 0$  helyen (11) alapján

$$\frac{\partial t_I}{\partial z} \Big|_{z=0^+} = -\frac{\alpha_G}{k_I} (t_G - t_F), \quad (11.a)$$

$z = \xi$  helyen (7) egyenlet alapján

$$\frac{\partial t_I}{\partial z} \Big|_{z=\xi^-} = \frac{k_{II}}{k_I} \frac{\partial t_{II}}{\partial z} \Big|_{z=\xi^+} - \frac{mK_G r}{k_I} (t_\xi - t_{hp}). \quad (7.a)$$

A (8) egyenlet a behelyettesítésekkel

$$\frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=\xi^+} = \frac{K_G m}{k_m} (t_\xi - t_{hp}), \quad (8.a)$$

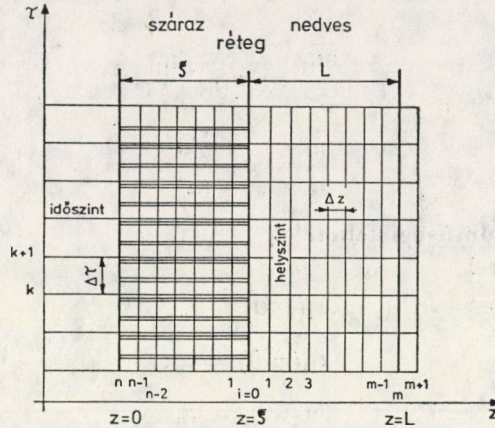
$z = L$  helyen

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_{II}}{\partial z} \Big|_{z=L^-} &= 0, \\ \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=L^-} &= 0. \end{aligned}$$

### 3. Numerikus megoldás

A (9a), (1) és (2) differenciálegyenlet-rendszert a (3), (4), (10), (11a), (7a), (8a), (5) és (6) egyértelműségi feltételekkel numerikusan oldjuk meg a véges differenciák módszerét alkalmazva. A megoldás során az explicit sémát választjuk, amikor is a határfelületekből kiindulva a numerikus megoldást lépésről lépésre állítjuk elő.

A numerikus megoldáshoz alkalmazott rács a 2. ábrán látható. A vízszintes tengely megfelel a hely, a függőleges pedig az idő koordinátának.



2. ábra. A numerikus megoldáshoz alkalmazott rács

Az (1) differenciálegyenletet differenciaegyenletté alakítva a

$$\frac{t_{i,k+1}^{\text{II}} - t_{i,k}^{\text{II}}}{\Delta\tau} = a_{\text{II}} \frac{t_{i-1,k}^{\text{II}} - 2t_{i,k}^{\text{II}} + t_{i+1,k}^{\text{II}}}{(\Delta z)^2},$$

összefüggést kapjuk. Bevezetve a

$$\lambda_{\text{II}} = \frac{\Delta\tau}{(\Delta z)^2} a_{\text{II}},$$

jelölést, az  $i = 1, 2, \dots, m-1$  helyen a keresett hőmérséklet a  $k+1$  időpillanatban:

$$t_{i,k+1}^{\text{II}} = \lambda_{\text{II}} t_{i-1,k}^{\text{II}} + (1 - 2\lambda_{\text{II}}) t_{i,k}^{\text{II}} + \lambda_{\text{II}} t_{i+1,k}^{\text{II}}. \quad (18)$$

Az  $i = m$  helyen az (5) egyenlet értelmében

$$t_{m-1,k}^{\text{II}} = t_{m+1,k}^{\text{II}}$$

illetve

$$t_{m,k+1}^{\text{II}} = (1 - 2\lambda_{\text{II}}) t_{m,k}^{\text{II}} + 2\lambda_{\text{II}} t_{m-1,k}^{\text{II}}, \quad (19)$$

Hasonlóan kapjuk a nedves anyag koncentrációit a vizsgált pontokban a (2) egyenlet alapján:

$i = 1, 2, \dots, m-1$  helyeken

$$u_{i,k+1} = \lambda_m u_{i-1,k} + (1 - 2\lambda_m) u_{i,k} + 2u_{i+1,k}, \quad (20)$$

és az  $i = m$  helyen

$$u_{m,k+1} = (1 - 2\lambda_m) u_{m,k} + 2\lambda_m u_{m-1,k}, \quad (21)$$



ahol

$$\lambda_m = a_m \frac{\Delta\tau}{(\Delta z)^2}.$$

A (8) egyenlet alapján

$$u_{0,k+1} = u_{1,k+1} - \frac{K_G m \Delta z}{k_m} (\Theta_{k+1} - t_{hp}), \quad (22)$$

ahol  $\Theta$  a két szilárd réteg határfelületének hőmérséklete a vizsgált időpontban,

$$t_{\xi,k+1} = \Theta_{k+1}.$$

A (9a) differenciálegyenletet differenciaegyenletté alakítva, a száraz réteg hőmérsékletét számíthatjuk:

az  $i = n-1, n-2, \dots, 1$  helyeken

$$\begin{aligned} t_{i,k+1}^I = & (1 - 2\lambda_1)t_{i,k}^I + t_{i+1,k}^I \left[ \lambda_1 - C_1 \frac{\Delta\tau}{2\Delta z} (\Theta_k - t_{hp}) \right] + \\ & + t_{i-1,k}^I \left[ \lambda_1 + C_1 \frac{\Delta\tau}{2\Delta z} (\Theta_k - t_{hp}) \right], \end{aligned} \quad (23)$$

ahol

$$\lambda_1 = \frac{\Delta\tau}{(\Delta z)^2} a_1,$$

és

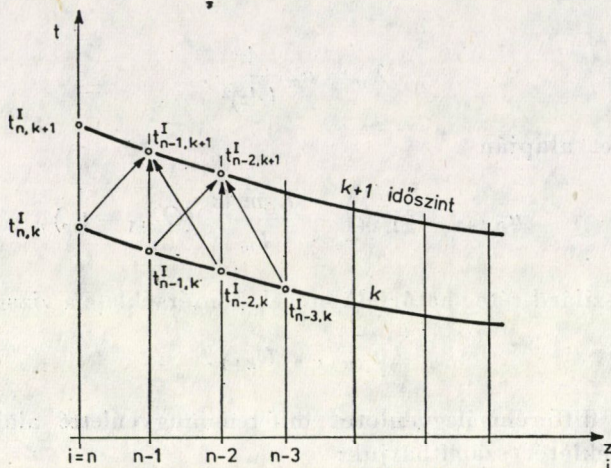
$$C_1 = - \frac{c_{pWG} m K_G}{c_1 \rho_1}.$$

A szárítólevegővel érintkező száraz réteg felszíni hőmérséklete ( $i = n$  hely) a (11a) egyenlet alapján számítható. Amennyiben feltételezzük, hogy a száraz réteg hőmérsékleteloszlása a hely szerint, másodfokú görbével leírható, a 3. ábrán látható módon, akkor a hőmérsékletgradiens:

$$\frac{\partial t}{\partial z} \Big|_{z=0}^{i=n} = \frac{-3t_{m,k+1} + 4t_{m-1,k+1} - t_{m-2,k+1}}{2\Delta z}$$

Fentiek alapján a felszíni hőmérséklet (hőmérséklet  $i = n$  helyen):

$$t_{n,k+1}^I = \frac{4t_{n-1,k+1}^I - t_{n-2,k+1}^I + \frac{2\Delta z}{k_1} \alpha_G t_G}{3 + \frac{2\Delta z}{k_1} \alpha_G}. \quad (24)$$



3. ábra. A feltételezett hőmérsékleteloszlás

A két szilárd fázis határhőmérséklete a (7a) peremfeltétellel definiált. Két különböző réteg határfelületére a véges differenciák módszerét alkalmazva [9], figyelembe véve a (7a) egyenletet, a határfelület hőmérséklete:

$$\Theta_{k+1} = \Theta_k + (t_{1,k}^I - \Theta_k) B \frac{2\lambda_I}{2\lambda_I - C_1(\Theta_k - t_{hp})\Delta z} - (\Theta_k - t_{1,k}^{II}) B \frac{k_{II}}{k_I} - (\Theta_k - t_{hp}) B \frac{rC_1\Delta z}{a_1c_{pwG}}, \quad (25)$$

ahol

$$B = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_I - C_1(\Theta_k - t_{hp})\Delta z} + \frac{k_{II}}{k_I 2\lambda_{II}}}$$

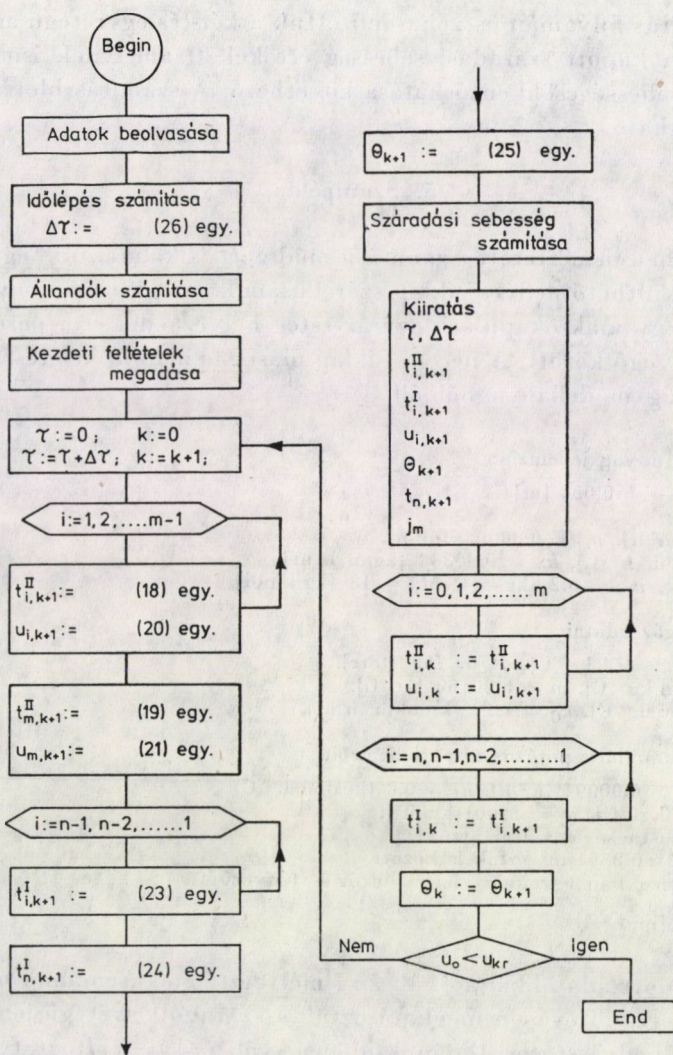
A numerikus számításban a hely és időlépés nagyságát a konvergencia kritériumnak megfelelően kell megválasztani. Tetszőlegesen megválasztott  $\Delta z$  helylépés esetén az időlépés nagyságának ki kell elégíteni az alábbi feltételt [2]:

$$\Delta\tau \leq \min [\lambda_I, \lambda_{II}, \lambda_m]. \quad (26)$$

#### 4. A számítás blokkdiagramja

A numerikus számítás során egyidejűleg számítottuk a száradó nedves anyag hőmérsékleteloszlását, száradási sebességét abban az esetben is, ha ugyanazon szárítólevegővel száraz, gátló réteg nélkül történt volna a szárítás.





4. ábra. A számítás blokkdiagramja

Erre az esetre a számítási összefüggések [2] alapján ismertek. A megoldás során feltételeztük, hogy a száradó anyag nedvességtartalma a szárítás folyamán nem éri el az anyag kritikus nedvességtartalmát és így

$$\varphi = 1$$

és

$$P_{wF} = P_{wt} \text{ (telítési érték).}$$

A számítás folyamán összehasonlítottuk a két- és egyrétegű anyag szárítása folyamán kapott száradási sebesség értékeket, amelynek ismeretében a száraz réteg sebességsökkentő hatása követhető. A számítás blokkdiagramja a 4. ábrán látható.

## 5. Számpélda

Fentiekben ismertetett számítási módszert alkalmazzuk egy végtelen hosszúnak tekinthető nedves síknap száradásának vizsgálatához olyan esetekben, amikor egy makrokapilláris száraz réteg helyezkedik el a párolgó felszín és a szárító levegő között. A nedves síknap másik felülete tökéletesen szigetelt, mindkét anyag modellanyagból áll.

A nedves anyag jellemzői:

$$L = \text{vastagság} = 0,036 \text{ [m]},$$

$$t_0^0 = 18 \text{ [}^\circ\text{C]},$$

$$a_{11} = 0,00152 \text{ [m}^2\text{/h]}, a_m = 0,00002 \text{ [m}^2\text{/h]},$$

$$k_{11} = 1,75 \text{ [kcal/m h }^\circ\text{C]}, k_m = 0,00333 \text{ [kg/m h at]},$$

$$u_0 = 0,5 \text{ [kg/kg]}, u_{kr} = 0,2 \text{ [kg/kg]}, M_w = 18 \text{ [kg/kmol]},$$

A szárítógáz adatai:

$$t_G = 45 \text{ [}^\circ\text{C]}, t_{hp} = 14,1 \text{ [}^\circ\text{C]}, P_\delta = 760 \text{ [torr]},$$

$$c_{pWG} = 0,46 \text{ [kcal/kg }^\circ\text{C]}, m = 0,00158 \text{ [at/}^\circ\text{C]},$$

$$\alpha_G = 9,0 \text{ [kcal/m}^2 \text{ h }^\circ\text{C]}, k_G = 1,12 \text{ [kmol/m}^2 \text{ h at]},$$

A makrokapilláris porózus réteg jellemzői:

$$t_0^0 = 18 \text{ [}^\circ\text{C]}, a_1 = 0,00094 \text{ [m}^2\text{/h]}, k_1 = 0,8 \text{ [kcal/m h }^\circ\text{C]},$$

$$c_1 = 0,355 \text{ [kcal/kg }^\circ\text{C]}, \rho_1 = 2400 \text{ [kg/m}^3\text{]}.$$

A száraz réteg vastagságát változtattuk

$$\xi = 0,012 - 0,036 \text{ [m]} \text{ értékek között.}$$

A makrokapillárisokban létrejövő vízgőz diffúziós tényezője

$$D_e = 0,1 \text{ [m}^2\text{/h]}.$$

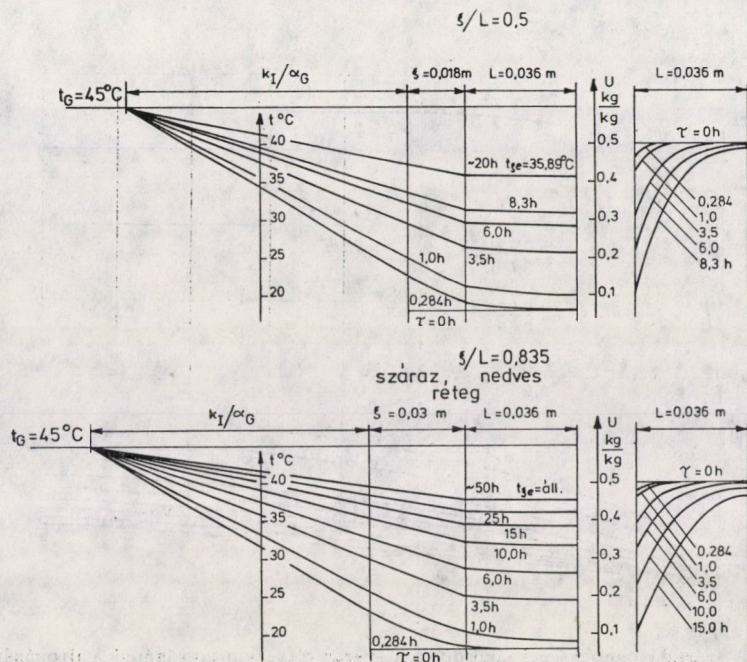
A megadott adatokkal a 4. ábrán ismertetett blokksémának megfelelően numerikusan, számítógépen meghatároztuk a száradó kétrétegű lemez hőmérsékletének és nedvességtartalmának időbeni változását. Változtatva a száraz réteg vastagságát, különben változatlan szárítási feltételek mellett, vizsgáltuk a réteg vastagságának hatását a száradó anyag száradási sebessége szempontjából.

## 6. Következtetések

Az 5. ábrán két különböző  $\xi/L$  (száraz réteg vastagsága/száradó nedves anyag vastagsága) érték esetében a különböző időpillanatokhoz tartozó hőmérséklet és nedvességtartalom eloszlások láthatók.

Az ábrából kitűnik, hogy egy kezdeti kialakulási idő után a száraz réteg hőmérsékletváltozása lineáris, a nedves anyagon belül az eloszlás parabolis-





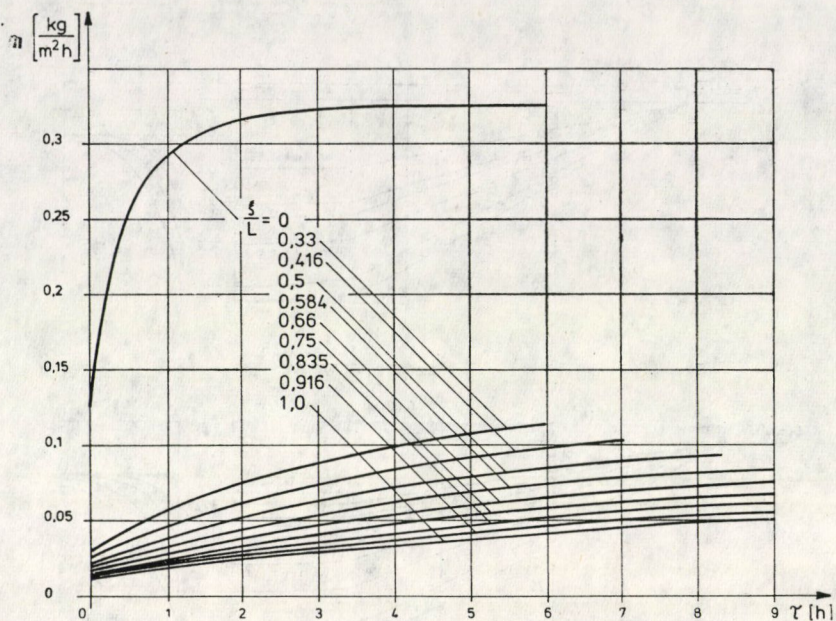
5. ábra. Kétrétegű anyagok hőmérsékletének alakulása a száradás folyamán

kus [10]. Mindkét esetben a szárítási idő növelésével a kettős réteg hőmérsékleteloszlása egy állandósult állapothoz tart, amely állandósult hőmérsékleteloszlás a nedves száradó anyagon belül egy állandó hőmérsékletet jelent (egyensúlyi hőmérséklet), a száradó rétegben pedig kialakul egy állandósult hőmérsékletgradiens, amelyet a póluspont és a száradó anyag egyensúlyi hőmérséklete tesz egyértelműen meghatározottá. A kialakuló egyensúlyi hőmérséklet csak a szárítógáz állapotjelzőinek és a száraz réteg anyagjellemzőinek függvénye. Az ábra alapján megállapítható, hogy a száraz réteg vastagságának növelésével a kialakuló egyensúlyi hőmérséklet emelkedik. Természetesen  $\xi = 0$  esetben a kialakuló egyensúlyi hőmérséklet az ún. nedves hőmérő hőmérséklet lesz. A száraz réteg vastagságának növelésével a száradási sebesség rohamosan csökken, amint azt a 6. ábra mutatja.

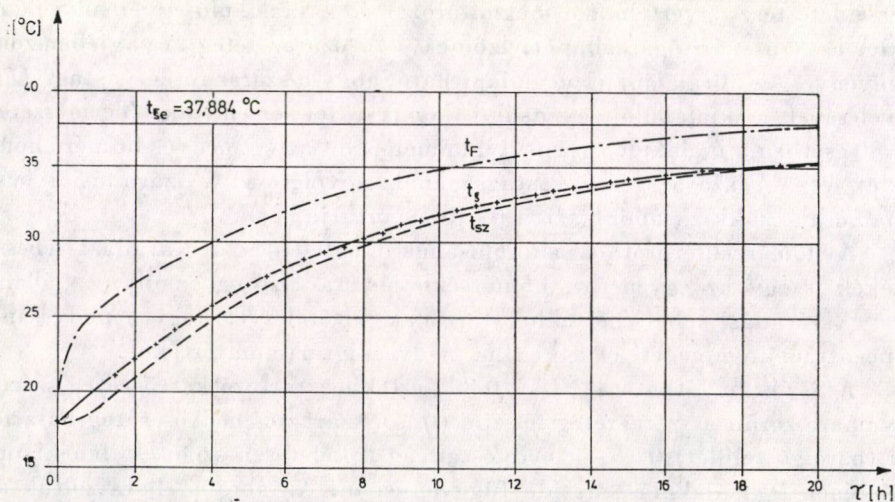
A hőmérsékletprofilok alakulásának megfelelően a száradási sebességértékek is egy az egyensúlyi hőmérsékletéhez tartozó egyensúlyi — állandósult — száradási sebességértékhez tartanak feltételezve, hogy a nedvesanyag koncentrációja nem éri el a kritikus nedvességtartalom értékét.

A 7. ábrán látható a  $\xi/L = 0,835$  értékhez tartozó kettősréteg szárítási folyamata során a szárazréteg felszíni ( $t_F$ ), a száraz és nedves réteg határfelületi (párolgó felület) ( $t_\xi$ ) és a nedves anyag tökéletesen szigetelt fenékhőmérsékletének ( $t_{sz}$ ) alakulása az idő függvényében. Az ábrába berajzoltuk a  $t_{\xi e}$  egyensúlyi határréteg hőmérséklet értékét is, az 5. ábra alapján.





6. ábra. A száradási sebességek alakulása a száraz réteg vastagságának változásával



7. ábra. A száradó modell jellemző hőmérsékleteinek alakulása a száradás folyamán

### 7. A kialakuló állandósult állapot jellemző paraméterei

A szárítási folyamat során kialakuló egyensúlyi állapot esetén a száradó anyag hőmérséklete, a száraz rétegben pedig a hőmérsékletváltozás állandó. Ekkor

$$-k_1 \frac{\partial t^I}{\partial z} \Big|_{z=0^+} = \text{áll} = -k_1 \frac{t_{\xi e} - t_F}{\xi},$$

és

$$\frac{\partial t^{II}}{\partial z} \Big|_{z=L^-} = 0.$$

A (7) határfeltétellel meghatározott belépő hőáram:

$$q_{kv} = \alpha_G(t_G - t_F) = -k_1 \frac{t_{\xi e} - t_F}{\xi},$$

Innen a belépő állandósult hőáram:

$$q_{kv} = K_H(t_G - t_{\xi e}) = j_{me}r = K_G^* M_w r (p_{w\xi e} - p_{wG}), \quad (27)$$

ahol

$$K_H = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_G} + \frac{\xi}{k_1}}. \quad (28)$$

A (27) egyenletből látható, hogy

$$\frac{p_{w\xi e} - p_{wG}}{t_{\xi e} - t_G} = - \frac{K_H}{r K_G^* M_w} \quad (29)$$

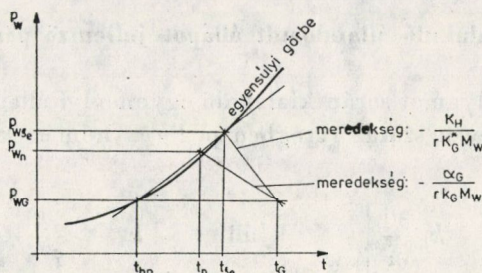
az egyensúlyi határhőmérsékletet egyértelműen meghatározza a  $t_G$ ,  $p_{wG}$  ponton átmenő ( $-K_H/rK_G^*M_w$ ) iránytangensű egyenes és az egyensúlyi görbe metszéspontja (8. ábra). Az egyensúlyi hőmérséklet értéke adott párolgó közeg esetén a szárítógáz hőfokán, nedvességtartalmán, a hő- és anyagátadási tényezőkön kívül jelentősen függ a száraz réteg vastagságától, ill. annak anyagjellemzőitől is.

Abban az esetben, ha a száraz réteg vastagsága zérus,  $\xi = 0$ , (27) alapján kapjuk, ha a kialakuló állandósult értékeket  $t_n$  és  $p_{wn}$ -el jelöljük:

$$\frac{p_{wn} - p_{wG}}{t_n - t_G} = - \frac{\alpha_G}{r k_G M_w}.$$

Az állandósult hőmérséklet ekkor az ún. nedves hőmérő hőmérséklet lesz, amely értéket fentiekhez hasonló módon határozhatunk meg, ha a szárító-





8. ábra. Az egyensúlyi határhőmérséklet meghatározása víz tenziógörbéjén

gázt meghatározó  $t_G$ ,  $p_{wG}$  ponton átmenő  $(-\alpha_G/rk_G M_w)$  iránytangensű egyenes és az egyensúlyi görbe metszéspontját megkeressük (8. ábra).

A (29) egyenletet átrendezve azt kapjuk, hogy

$$\frac{P_{w\xi e} - P_{wG}}{t_G - t_{\xi e}} = \frac{\alpha_G}{rk_G M_w} T,$$

ahol

$$T = \frac{1 + \xi \frac{k_G RT}{D_e}}{1 + \xi \frac{\alpha_G}{k_1}}.$$

Amennyiben  $T > 1$ , az egyensúlyi  $t_{\xi e}$  hőmérséklet nagyobb, mint a nedves hőmérő hőmérséklet. Ez akkor lehetséges, ha

$$\frac{\xi k_G RT}{D_e} > \frac{\xi \alpha_G}{k_1}.$$

Miután  $k_G RT \approx k'_c$  [11], átrendezve kapjuk:

$$\frac{k_1}{D_e} > \frac{\alpha_G}{k'_c} = c_{pL} \varrho_L L e^z \approx c_{pL} \varrho_L L. \quad (30)$$

A (30) egyenlőtlenség a legtöbb gyakorlati esetben igaz és így a kialakuló egyensúlyi hőmérséklet  $t_{\xi e} > t_{nL}$ .

A 8. ábra alapján, ha az egyensúlyi görbét a vizsgált intervallumban  $m$  iránytangensű egyenesnek tekintjük, akkor

$$P_{w\xi e} - P_{wG} = m(t_{\xi e} - t_{hp}),$$

(29) egyenletbe helyettesítve és rendezve az egyensúlyi hőmérséklet

$$t_{\xi e} = \frac{t_{hp} + t_G \frac{K_H}{rm K_G^* M_w}}{1 + \frac{K_H}{rm K_G^* M_w}}. \quad (31)$$



Ugyanakkor  $\xi = 0$  esetben a nedves hőmérő hőmérséklet:

$$t_{nL} = \frac{t_{hp} + t_G \frac{\alpha_G}{rmk_G M_w}}{1 + \frac{\alpha_G}{rmk_G M_w}}. \quad (32)$$

Kettős réteg esetén az állandósult száradási sebesség

$$j_{m \text{ áll}} = K_G^* M_w m (t_{\xi e} - t_{hp}), \quad (33)$$

egyrétegű anyag felszíni száradása esetében:

$$N_{\text{áll}} = k_G M_w m (t_{nL} - t_{hp}). \quad (34)$$

A száraz réteg hatása a száradás sebességére meghatározható, ha a (33) egyenletet elosztjuk (34) egyenlettel:

$$\frac{j_{m \text{ áll}}}{N_{\text{áll}}} = \frac{K_G^*}{k_G} \frac{t_{\xi e} - t_{hp}}{t_{nL} - t_{hp}}. \quad (35)$$

A (16) egyenlet alapján látható, hogy

$$\frac{K_G^*}{k_G} = \frac{1}{1 + \xi \frac{RT}{D_e} k_G}.$$

A 9. ábra alapján belátható, hogy

$$\frac{t_{\xi e} - t_{hp}}{t_{nL} - t_{hp}} = \frac{K_H k_G}{K_G^* \alpha_G} \frac{t_G - t_{\xi e}}{t_G - t_{nL}}.$$

Behelyettesítve (35) egyenletbe és rendezve, a

$$\frac{j_{m \text{ áll}}}{N_{\text{áll}}} = \frac{1}{K_H} \frac{t_G - t_{\xi e}}{\alpha_G t_G - t_{nL}}.$$

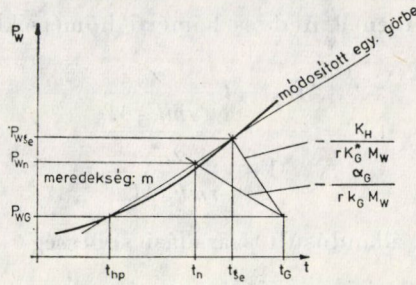
összefüggést kapjuk. Az előzőekben láttuk, hogy  $t_{\xi e} \geq t_{nL}$  és minthogy  $\alpha_G \geq K_H$ , ezért

$$\frac{j_{m \text{ áll}}}{N_{\text{áll}}} \leq 1.$$

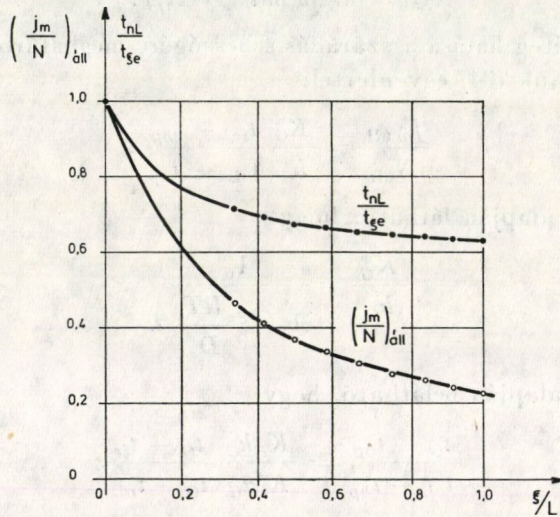
$\xi = 0$  esetben (száraz réteg nincs):

$$j_{m \text{ áll}} = N_{\text{áll}}.$$

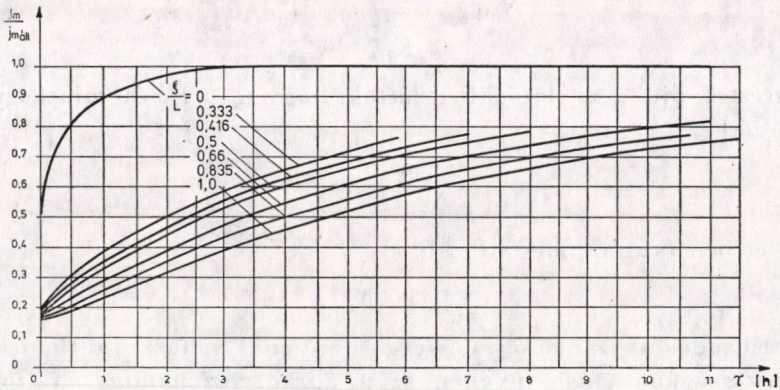
Az állandósult száradási sebességek arányának változása látható a száraz réteg vastagságának függvényében a 10. ábrán. Az ábrába berajzoltuk az állandósult hőmérsékletek arányának változását is.



9. ábra. Az egyensúlyi, a harmatponti és a nedves hőmérő hőmérsékletének kapcsolata



10. ábra. Az állandó száradási sebesség arány változása a száraz réteg vastagságával



11. ábra. A száradási sebességviszony alakulása az idő függvényében

A szárítás szempontjából fontos az az idő is, amely alatt a száradási sebesség értéke eléri az állandósult — melegedve száradás esetén a maximális — száradási sebességértéket. A száraz réteg vastagságának növelése növeli ezt a kialakulási időt.

A (15) és (33) egyenletet elosztva egymással, megkapjuk a mindenkor pillanatnyi száradási sebesség és az állandósult száradási sebesség értékének hányadosát, tehát az alábbi függvényt:

$$\frac{j_m}{j_{m\text{ áll}}} = f(\tau).$$

A 11. ábrán látható a száraz réteg vastagságának hatása a száradási sebesség viszony alakulására.

#### IRODALOM

1. LIKOV, A. V.: A szárítás elmélete. Nehézipari Könyvkiadó, Budapest 1952
2. IMRE L.: Szárítási Kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1974
3. KRISCHER, O.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer-Verlag, Berlin 1963
4. KEYEY, R. B.: Drying Principles and Practice. Pergamon Press, Oxford 1972
5. HENRY, J. P.—CUNNINGHAM, R. S.—GEANKOPLIS, C. J.: Diffusion of Gases in Porous Solids over a Thousand-fold Pressure Range. *Chemical Engineering Science* 22 (1967), 11—20
6. ROTHFELD, L.: Gaseous Counterdiffusion in Catalyst Pellets. *A. I. Ch. E. Journal* 9 (1963), 1
7. DULLIEN, F. A.—SCOTT, S. C.: The Flux-ratio for Binary Counterdiffusion of Ideal Gases. *Chemical Engineering Science* 17 (1962), 771—775
8. SCOTT, S. C.—DULLIEN F. A.: Diffusion of Ideal Gases in Capillaries and Porous solids. *A. I. Ch. E. Journal* 8 (1962), 1
9. CARNAHAN, B.—LUTHER, H.—WILKES, J.: Applied Numerical Methods. John Wiley & Sons. Inc. New York 1969
10. SZENTGYÖRGYI S.—MOLNÁR K.: A fázisváltozási kritérium értékének hatása a szárítás folyamatára a szabad nedvesség párolgásának időszakában. *Gép* 26 (1974), 3
11. SZENTGYÖRGYI S.: Vegyipari Gépek I. 2. Tankönyvkiadó, Budapest 1966. (Egyetemi jegyzet J4—448.)