

Egy modell szigetelőanyagok nedvességtartalma változásaihoz

ETO 532.685.072:621.315.61

A híradástechnikában használatos szerves szigetelőanyagoknak véges nagyságú, megmérhető vízfellevő és vízgőzáteresztő képessége van.

A szigetelőanyagban a nedvesség koncentrációja hatással van az elektromos jellemzőkre (dielektromos állandó, veszteségtényező, szigetelési ellenállás, átütési szilárdság).

A nedvességkoncentráció változásait a környezeti változások, s köztük különösen a környező levegő relatív páratartalmának a változásai „gerjesztik” és (a bennünket érdeklő esetekben) elsősorban a diffúzió mechanizmusa közvetíti a homogén szilárd anyagban.

A környezetben és annak hatására a szilárd anyag felületén végbemenő nedvesség-változások csillapítva terjednek tovább az anyag belseje felé. A csillapítás mértékének ismeretében tájékozódhatunk a nedvességkoncentráció (elektromos szempontból döntő) várható szélső értékeiről.

A nedvességkoncentráció-változások csillapítása függ a környezeti változások tényleges (általában sztochasztikus) időfüggvényétől, a szigetelőanyag fizikai tulajdonságaitól (vízgőz diffúziós együttható, telítési nedvességkoncentráció), geometriai méreteitől és alakjától stb. Használható mennyiségi összefüggések csak a konkrét viszonyokat kisebb-nagyobb mértékben leegyszerűsítő modellekre állapíthatók meg.

A következő pontban egy egyszerű modellt vezetünk be és vizsgálunk meg. Az utolsó pontban pedig modellünk alkalmazási lehetőségeire mutatunk rá.

A modell

A diffúziós nedvességáramlás alapegyenlete (lásd például [1]-ben):

$$i = -D \text{ grad } c \quad (1)$$

ahol i a nedvesség áramsűrűsége [$\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$], c a nedvesség-koncentráció [g/m^3], $\text{grad } c$ a koncentráció gradiense [g/m^4], D a diffúziós együttható [m^2/h].

Kis vízfellevő képességű anyagokban érvényes az alábbi összefüggés [2]:

$$m = D^* \frac{F \cdot T \cdot (p_1 - p_2)}{d} \quad (2)$$

itt m a diffundált vízmennyiség [g], F a diffúzió irányára merőleges felület [m^2], T a vizsgálat ideje órákban [h], $(p_1 - p_2)$ a gőznyomáskülönbség [torr], d a próbatest falvastagsága [m], D^* a diffúziós állandó [$\text{g}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{torr}$].

A (2) összefüggés alapján D^* kísérletileg meghatározható.

Az (1)-beli D és a (2)-beli D^* között úgy teremtünk kapcsolatot, hogy mindkettővel ugyanazt a kísérletet írjuk le. Nevezetesen: F felületű, d vastagságú próbatest (membrán) egyik határfelületén telített vízgőz van, melynek nyomása a vizsgálat t hőmérsékletén p_{gt} (torr). Ugyanezen határfelület menti „végtelenül vékony” szilárdanyag-rétegben a nedvességkoncentráció az anyagra jellemző c_{\max} (g/m^3) értékű. A próbatest másik felületén a gőznyomás és a határrétegbeli nedvességkoncentráció egyaránt nulla (erről az átdiffundáló víz folyamatos eltávolításával gondoskodunk).

Feltételeinkkel:

$$p_1 - p_2 = p_{gt}$$

$$\text{grad } c = \frac{c_{\max}}{d}$$

Feltesszük még, hogy beállott az állandósult állapot.

A T idő alatt átdiffundált vízmennyiség (1)-ből:

$$m = i \cdot FT = \frac{D \cdot c_{\max} FT}{d} \quad (3)$$

(2)-ből:

$$m = D^* \frac{FT p_{gt}}{d} \quad (4)$$

(3) és (4) ugyanazt a kísérleti eredményt írják le (ugyanazt az átdiffundált vízmennyiséget adják meg), tehát egyenlők:

$$\frac{D \cdot c_{\max} FT}{d} = \frac{D^* FT p_{gt}}{d}$$

Ebből:

$$D [\text{m}^2/\text{h}] = \frac{p_{gt} [\text{torr}]}{c_{\max} [\text{g}/\text{m}^3]} D^* [\text{g}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{torr}] \quad (5)$$

Az irodalomban (lásd pl. [2] és [3]) általában D^* -ra található adatok (ezekre még visszatérünk).

Ezek után (1) további felhasználásáról.

Az anyagmegmaradás törvénye értelmében egy dV térfogat részben dt idő alatt bekövetkező nedvességtartalom-változás és az ezen térfogatrészt körül vevő A zárt felületen áthaladó nedvességáram közti összefüggés:

$$c(t+dt) - c(t) = \left(\int_A tdA \right) dt \quad (6)$$

Ezt átrendezve, $dV \rightarrow 0$ és $dt \rightarrow 0$ határátmeneteket képezve, a vektoranalízis ismert fogalmaival (lásd pl. [4]):

$$\frac{dc}{dt} = \lim_{dV \rightarrow 0} \frac{\oint_{\Delta} i \, dA}{dV} = \text{div } i. \quad (7)$$

(1)-et (7)-el összevetve, a $\text{div grad } c = \Delta c$ összefüggést felhasználva:

$$\begin{aligned} \frac{dc}{dt} &= \text{div } i = \text{div} (-D \text{ grad } c) = \\ &= -D \text{ div grad } c = -D \Delta c \\ \Delta c &= -\frac{1}{D} \frac{dc}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

Derékszögű koordináta-rendszerben:

$$\Delta c = \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}. \quad (9)$$

További vizsgálódásunkat az alábbi fizikai elrendezésre korlátozzuk:

Az (x, y, z) derékszögű koordináta-rendszerben egy $2d$ vastagságú lemez foglal helyet, melyet az $x = -d$ és az $x = d$ végtelen síkok határolnak (lásd 1. ábra, a).

A lemez két oldalán levő félterekben a relatív páratartalom egy φ_k középérték körül ω frekvenciával harmonikus időfüggvény szerint változik, φ_{var} amp-

litúdóval. Ez a lemez határretegeiben ugyanilyen jellegű koncentrációváltozást kényszerít ki, a

$$c_k = c_{\text{max}} \frac{\varphi_k}{\varphi_{\text{max}}}$$

középérték körül,

$$c_{\text{var}} = c_{\text{max}} \frac{\varphi_{\text{var}}}{\varphi_{\text{max}}}$$

amplitúdóval. Feltesszük továbbá, hogy a leírt folyamat már állandósult, s a lemez bármely pontjában ugyancsak c_k érték körül, ω frekvenciával, de a helytől függő amplitúdóval harmonikus időfüggvény szerint változik a nedvességkoncentráció.

A leírt viszonyokra érvényes összefüggések:

$$\frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

$$c(t)|_{x=\text{konst}} = c_k + c_{\text{var}}(x) \cdot e^{j\omega t}. \quad (11)$$

Ezeket felhasználva (8) így egyszerűsödik:

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = -\frac{1}{D} \frac{\partial c}{\partial t}. \quad (12)$$

A koncentráció kétváltozós függvény (x és t a független változók.) Tekintve azonban, hogy az időtől való függése bármely x helyen (11) alakú, előállítható, mint két egyváltozós függvény szorzata:

$$c(x, t) = c(x) \cdot c(t). \quad (13)$$

Ezt a körülményt, továbbá a rendszer szimmetria viszonyait figyelembe véve a (12) differenciálegyenlet megoldását a következő alakban keressük

$$c(x, t) = c_k + C[e^{\gamma(x-d)} + e^{-\gamma(x+d)}] \cdot e^{j\omega t}. \quad (14)$$

(14)-ből a megfelelő parciális deriváltakat képezve, azokat (12)-be téve meghatározható γ azon kifejezése, mellyel (14) valóban megoldása (12)-nek. A rutinszámításokat itt mellőzzük, csak az eredményt jegyezzük fel:

$$\gamma = -\sqrt{\frac{\omega}{2D} + j} \sqrt{\frac{\omega}{2D}} = \alpha + j\beta \quad (15)$$

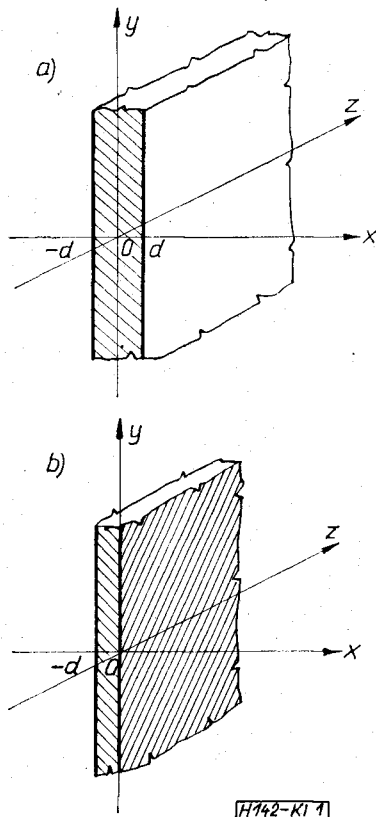
γ reális része, felhasználva a periódusidő $T = \frac{2\pi}{\omega}$ definícióját is:

$$\alpha = \text{Re}[\gamma] = -\sqrt{\frac{\pi}{DT}}. \quad (16)$$

Modellünkben $c(x, t)$ tükörszimmetrikus az $x=0$ síkra. A koncentráció ezen sík két oldalán minden időpillanatban azonos. Ebből következik, hogy az $x=0$ síkon az eredő nedvességáramlás zérus. Nem zavarja meg a viszonyokat, ha sík lemezünk egyik, pl. az $x=0$ és $x=d$ síkok által határolt felét elhagyjuk s az elhagyott részt egy „tökéletes” nedvességzáró réteggel (pl. fémlappal) helyettesítjük. A továbbiakban ezt a modellt vizsgáljuk (l. 1. ábra, b).

A koncentráció változó részének helytől függő maximális amplitúdója (14) alapján:

$$c(x) = c(x, t)|_{t=nT} = C[e^{\gamma(x-d)} + e^{-\gamma(x+d)}]. \quad (17)$$



1. ábra

$c(x)$ két komplex mennyiség összege. Az összeg maximális abszolút értéke a tagok abszolút értékeinek összege:

$$|c_{\max}(x)| = C[e^{\alpha(x-d)} + e^{-\alpha(x+d)}]. \quad (18)$$

Az $x = -d$ helyen és az $x = 0$ helyen bekövetkező maximális koncentrációváltozások viszonya:

$$B = \frac{|c_{\max}(x = -d)|}{|c_{\max}(x = 0)|} = \frac{e^{-2\alpha d} + 1}{2e^{-\alpha d}} = \frac{e^{\alpha d} + e^{-\alpha d}}{2} = \text{ch } \alpha d. \quad (19)$$

α -t 16-ból beírva, s a mértékegységeket is feltüntetve (figyelemmel D már ismertetett mértékegységére), s kihasználva, hogy a $\text{ch } x$ függvény páros függvény (argumentumában a negatív előjel figyelmen kívül hagyható):

$$B = \text{ch } \frac{d^{[m]} \sqrt{\pi}}{\sqrt{D \cdot T^{[h]}}}. \quad (20)$$

Alkalmazás

A két „feltér” által határolt, $2d$ vastagságú lemezmodellünk alkalmazható olyan lemezekre és csövekre, melyek vastagsága, ill. falvastagsága egyéb méreteikhez képest kicsi.

Az egyik oldalán nedvességzáró réteggel határolt d vastagságú modellünk alkalmazhatósága szempontjából számbajövő objektumok például:

- műanyag fóliából (dielektrikum, melynek néhány külső „menete” a burkolat) és fémfóliából (fegyverzet) tekerceselt kondenzátorok;

- nyomtatott huzalozású lemezek (melyeknél a folírozott oldalon a felület túlnyomó részét maratás után is fémréteg borítja);

- viszonylag kis falvastagságú műanyag házba préselt vagy védő lakkréteggel bevont egyes mikroelektronikai építőelemek (üvegalapú vékonyréteg áramkörök stb.).

A környezeti nedvességváltozás időfüggvényére tett modell-feltételünk kapcsolatba hozható pl. a környezet napi változásaival (a napszak, ill. az üzem és üzemszünet váltakozásai szerint) vagy az évszakokhoz kötődő változásokkal. A konkrét időfüggvények ugyan sztochasztikusak, de egy-egy vonatkozásban elfogadhatóan közelíthetők periodikus folyamatokkal. Ha pedig vizsgálódásunkat a periodikus folyamat alapharmonikusára elvégezve a nedvességváltozások „csillapítását” megfelelőnek (elég nagy) találjuk, a „felharmonikusokra” vonatkozóan bizonyára még kedvezőbb a helyzet (a periódusidő csökkenésével – ahogyan az (20)-ból kitűnik – B növekszik).

Az egyszerű modell, ha kellő körültekintéssel, óvatossággal alkalmazzuk, jó szolgálatokat tesz a műszaki tájékozódásban.

Irodalmi adatok alapján közöljük néhány anyagra a maximális nedvességkoncentráció (c_{\max}) és a diffúziós állandó (D^*) adatait, továbbá az (1)-ben szereplő diffúziós együttható (D) (5) összefüggés alapján kiszámított értékeit, 25°C -on, amelynél a telített gőz nyomása (p_{gt}) 23,76 torr. Mindezeket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat

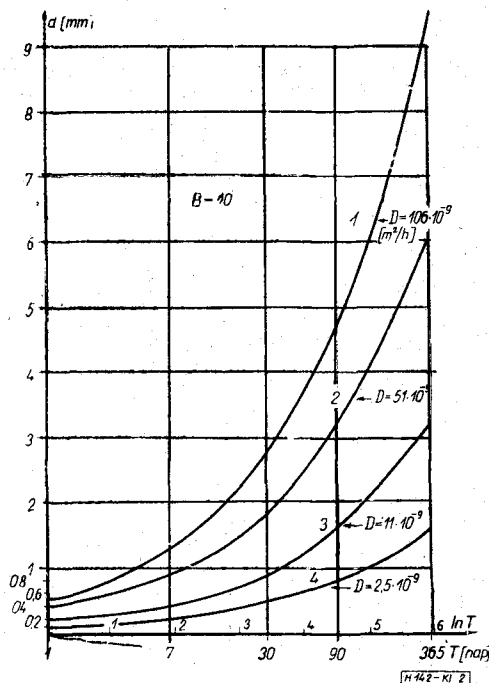
Anyag neve	C_{\max} [g/m ³]	D^* [g/m·h·torr]	$D = \frac{p_{gt}}{C_{\max}} \cdot D^*$ [m ² /h]
Polietilén	92	$2 \cdot 10^{-7}$	$51 \cdot 10^{-9}$
Polietilén-glikol-tereftalát	6500	$7 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$
Polivinilklorid, kemény	5600	$9 \cdot 10^{-7}$	$3,8 \cdot 10^{-9}$
Polisztirol	735	$33 \cdot 10^{-7}$	$106 \cdot 10^{-9}$
Polikarbonát	7800	$37 \cdot 10^{-7}$	$11 \cdot 10^{-9}$
Nemes fenolgyanta	300	$47 \cdot 10^{-7}$	$376 \cdot 10^{-9}$
Polivinilklorid, lágyított	14 000	$48 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-9}$

A (20) összefüggés és az 1. táblázat adatai alapján, paraméterként rögzített B értékre, különböző diffúziós együtthatókra meghatározható a műanyag réteg szükséges d vastagsága a környezeti nedvességváltozás periódusidejének (T) a függvényében.

A számítások eredményeit $B=10$ érték mellett, néhány anyagra a 2. ábra diagramjai foglalják össze. A d anyagvastagságot mm-ben, a T periódusidőt napokban tüntettük fel, így a napi és az évszakos változások hatása jól követhető.

Az 1., 2., 3., 4. sz. görbék rendre polisztirolnak, polietilénnek, polikarbonátnak, polietilén-glikol-tereftalátnak (pl. Hostaphau, stb.) felelnek meg.

Példa a diagram használatára: A környezet relatív páratartalma egy „szobahőmérsékleten” tartott helyiségben 1 éves periodicitással 60% középérték



2. ábra

körül $\pm 15\%$ -kal ingadozik. Ahhoz, hogy ennek a külső határfelület nedvességtartalmára kifejtett hatása csak egytized részére csökkentve (2,3 népercsillapítása a nedvességtartalom váltakozó összetevője amplitúdójának) jelenjék meg a polietilén védőburkolat belsejében (melyet belül nedvességzáró réteg határol), 6,1 mm vastag védőburkolatot kell alkalmazni. Ugyanezen feltételek pl. polikarbo-

nát alkalmazásával már 3,2 mm rétegvastagsággal teljesíthetők.

I R O D A L O M

- [1] *A. V. Likov: A szárítás elmélete*
- [2] *Műanyag-zsebkönyv. (Szerk. Kovács L.)*
- [3] *Schnöller A.—Tóth G.: Híradás és műszeripari alkatrészek II.*
- [4] *Simonyi K.: Villamosságtan.*