

SZILIKÁTÜVEGEK VISZKOZITÁS—HŐMÉRSEKLET FÜGGVÉNYE

KNAPP OSZKÁR
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK DOKTORA

[Beérkezett 1967. május 2-án]

Az üveg viszkozitása mind elméleti, mind gyakorlati szempontból fontos szerepet játszó fizikai tulajdonság. Gyakorlati szempontból az adja meg fontosságát, hogy az üveg olvasztása, megmunkálása és hűtése, annak összetételétől függetlenül, azonos viszkozitási értékek határai között végezhető el. E viszkozitási határok a különböző összetételű üvegek esetében azonban más hőmérsékletszakaszok között jelentkeznek. Adott összetételű üveg gyártásánál tehát a viszkozitás—hőmérséklet függvény ismerete a gyártás eredményes kivitelét elősegíti és biztosítja. Elméleti szempontból is szerepe van a viszkozitás—hőmérséklet függvény ismeretének, mert annak birtokában bepilantást nyerünk a belső sűrűlódás mértékére és az egyes üvegoxidoknak a belső sűrűlódásra kifejtett hatására. Miután a viszkozitás és annak aktiválási energiája között szoros az összefüggés, a viszkozitás értékeiből a sűrűlódási aktiválási energia együtthatója is kiszámítható [1].

A viszkozitás—hőfok görbe grafikus megszerkesztése a mérések alapján meglehetősen bonyolult és hosszadalmas feladat. Ennek a munkának elkerülése céljából sok kutató foglalkozott azzal a problémával, hogy a szilikátüvegek viszkozitási és azokhoz tartozó hőfok-értékek között matematikailag kifejezett összefüggést állapítsanak meg. Ily összefüggés birtokában már kevés mérési adat alapján lehetővé válik a teljes görbe grafikus megszerkesztése.

Az első kutató, aki a szilikátüvegek viszkozitási és hőfok-értékeire egyenletet állított fel, LE CHATELIER [2] volt. Egyenlete

$$\log \log \eta = A_1 - B_1 t, \quad (1)$$

ha t a $^{\circ}\text{C}$ -ban kifejezett hőmérséklet, A_1 és B_1 pedig a vegyi összetételtől függő anyagállandók. Ez az egyenlet azonban csak a nagyobb hőfokszakaszokban ad lineáris összefüggést, a $\log \log \eta = 0,6$ értéken alul azonban eltér az egyenestől. Később LE CHATELIER egyenletét a következőképpen módosította [3]:

$$\log \log \eta = m \left(\frac{t - 1000}{1000} \right) + N, \quad (2)$$

amely egyenletben N a viszkozitás értéke 1000 C°-on, M pedig egy, a vegyi összetételtől függő anyagállandó. Miként PRESTON [4] megállapította, ez az egyenlet sem alkalmas a viszkozitás—hőfok görbe lefutásának teljes kifejezésére és csak kis hőfokszakaszok között érvényes.

POOL [5] a viszkozitás és hőmérséklet függvényét az

$$\text{Ar sinh log } \eta = A_2 + B_2/T \quad (3)$$

egyenlettel fejezte ki, amelyben T az abszolút hőmérsékletet jelenti, A_2 és B_2 pedig állandók. Bizonyos összetételű üvegek esetében az egyenlet lineáris összefüggést mutatott, az egyenes pedig az origóból indult ki. LILLIE [6] azonban megállapította, hogy általában a mért értékek eltérnek az egyenestől és nem tartanak az origó felé.

DE GUZMAN [7] elméleti elgondolások alapján az

$$\eta = A_3 e^{B_3/T} \quad (4)$$

egyenletet állította fel, amelyben T az abszolút hőmérséklet, A_3 és B_3 állandók. Ezzel az egyenlettel számítva a szilikátüvegek viszkozitás—hőfok függvénye csak bizonyos hőmérsékletszakaszban lineáris ugyan, azonban ezen hőmérsékletszakaszon belül az állandók értéke nem azonos és az egyenesek szögben metszik egymást

FRENKEL [8] a de Guzman-féle egyenletet a következőképpen módosította:

$$\eta = A_4 \cdot T e^{B_4/T}. \quad (5)$$

A mért és számított eredmények azonban azt mutatták, hogy az állandók értéke a nagy és kis hőmérsékleteken nem azonosak.

EYRING [9], miután kutató elődei a viszkozitás—hőmérséklet görbét egyetlenegy egyenlettel nem tudták kifejezni, két képletet állított fel. Szerinte kis hőmérsékleteken

$$\eta = A_5 e^{E/RT} \cdot e^{AE/RT} \quad (6a)$$

és nagy hőmérsékleteken

$$\eta = A_6 e^{AE/RT}. \quad (6b)$$

A szerző számításai [1] azonban azt eredményezték, hogy az A_5 és A_6 , valamint az E értékei különböző hőmérsékletszakaszokon nem állandók.

DOUGLAS [10] egyenletei még bonyolultabbak. Nagy hőmérsékleteken

$$\eta = A_7 T e^{B_7/T}, \quad (7a)$$

és kis hőmérséklet szakaszokon

$$\eta = A_8 T e^{B_8/T} (1 + C e^{D/RT}). \quad (7b)$$

Az utóbbi egyenletben már négy állandó szerepel, ami alkalmazását igen bonyolulttá teszi. Ha kiszámítjuk A_8 és B_8 értékeit a (7a) egyenlet segítségével, azt tapasztaljuk, hogy a számított és mért eredmények között tekintélyes eltérések mutatkoznak.

Szovjet kutatók [11] feltételezték, hogy az aktiválási energia a szerkezeti kötéssel arányos, az utóbbi pedig a hőmérséklettel fordítottan arányos, s ezen alapon a következő egyenletet állították fel:

$$\log \eta = A_9 + \frac{B_9}{T} e^{\beta/T}. \quad (8)$$

Számításaik ólomüvegekre vonatkoznak. Azt találták, hogy $\log \eta - 1/T^2$ koordinátarendszerben $\log \eta = 1 \div 3$ értékek között az összefüggés lineáris. $\log \eta = 4$ érték felett azonban az egyenlet helyességét nem vizsgálták.

OHOTIN [12] az üveg viszkozitásának és hőmérsékletének összefüggését a következő képlettel fejezi ki:

$$\log \eta = M + \frac{N}{T^n}, \quad (9)$$

amelyben az M és az N állandók, az n értéke kb. 2. Miként a következőkben bizonyítást nyer, a $\log \eta - 1/T^2$ diagramban a viszkozitás—hőmérséklet görbét két egyenes jelzi, amelyek a transzformációs szakaszban — abban a szakaszban, amelyben az egyensúlyi állapot elérésére igen hosszú idő szükséges — szöveget zárnak be egymással.

WADLEIGH [13] különböző összetételű optikai üvegek viszkozitását tanulmányozta és annak a hőmérséklettel összefüggő viselkedését a következő bonyolult egyenletekkel fejezte ki:

Könnyű baritüvegekre

$$\log \eta = \gamma - \frac{\alpha}{\beta} \sqrt{\beta^2 - 1450 - t}; \quad (10a)$$

könnyű koronaüvegekre

$$\log \eta = \frac{\beta}{(t - 273)^2} - \alpha; \quad (10b)$$

boroszilikát koronaüvegekre

$$\log \eta = \alpha + \beta (29 - 0,02 t) + (29 - 0,02 c)^2; \quad (10c)$$

nehéz flintüvegekre

$$\log \eta = \alpha + \beta \gamma^{-\epsilon t}; \quad (10d)$$

közép flintüvegekre

$$\log \eta \cdot \alpha \log (\eta - T) = \alpha \beta \gamma^{-\epsilon t}; \quad (10e)$$

barit flintüvegekre

$$\log \eta = \alpha + \beta(\gamma - \epsilon t) \delta. \quad (10f)$$

Az α , β , γ , δ konstansok adott összetételű üvegeknél állandók, különböző összetételű üvegeknél azonban eltérők. Így α értéke 0,72 és 18,75 között; β értéke 0,0775 és $8 \cdot 10^{-6}$ között; γ értéke 0,34 és 20,5 között; δ értéke pedig csekély mértékben változik. ϵ értéke a vizsgált üvegek mindegyikénél állandó. WADLEIGH egyenletei igen bonyolultak, az öt állandó kiszámítása pedig hosszadalmas: általános gyakorlati célokra tehát nem alkalmasak.

FULCHER [14] a viszkozitás—hőfok összefüggést oly hiperbolikus görbével jellemezte, melynek egyenlete logaritmizálva,

$$\log \eta = A_{10} + \frac{B_{10}}{T - T_0}. \quad (11)$$

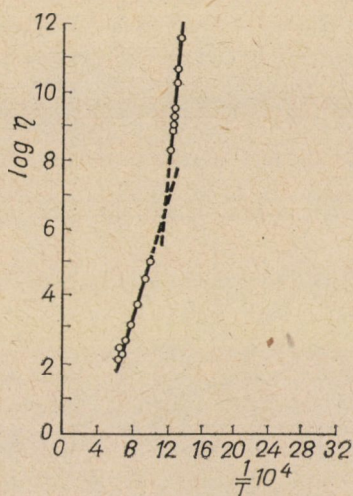
Az egyenletben A_{10} , B_{10} és t_0 állandók. A Fulcher-féle egyenlet, miként azt több kutató ellenőrizte, a mért és számított adatok között igen jó megegyezést mutat.

Egy $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2 \text{SiO}_2$ összetételű üveg viszkozitásának mérésével kapcsolatban a szerző a mért értékeket $\log \eta - 1/T$ diagramba helyezte [15]. Miként az 1. ábra mutatja, a vizsgált üveg viszkozitása és a reciproka abszolút hőfok között nincs lineáris összefüggés. A mért pontok ugyan 10^2 és 10^5 poise között, valamint 10^8 és 10^{12} poise között egyenes vonal mentén fekszenek, a két egyenes azonban szöveget zár be egymással. Ez a körülmény arra a következtetésre vezet, hogy mindazok az egyenletek, amelyek a $\log \eta - 1/T$ összefüggésen alapszanak, nem jellemezhetik a viszkozitás—hőfok teljes lefutását.

Ugyanennél az üvegnél megkísérelte a szerző, hogy a $\log \eta - 1/T^2$ összefüggést ábrázolja; az eredmény azonban ugyanaz volt, kis és nagy, a transzformációs szakasz alatti és feletti hőmérsékletszakaszokra ez a kifejezés sem jellemzi a viszkozitás—hőfok függvényt.

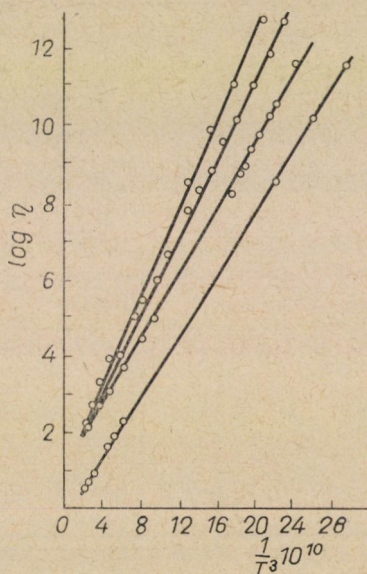
Ezek után a szerző megkísérelte, hogy a $\log \eta - 1/T^3$ összefüggést vizsgálja. Arra az eredményre jutott, hogy ilyen módon 10^2 és 10^{12} poise viszkozitás-értékek között lineáris összefüggés jelentkezik, amelyet a

$$\log \eta = A_{11} + \frac{A_{11}}{T^3} \quad (12)$$



1. ábra. $\text{Na}_2 \cdot \text{SiO}_2$ üveg viszkozitása a reciprok abszolút hőmérséklet függvényében

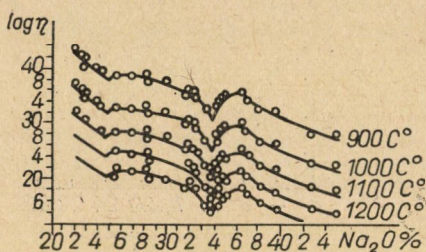
egyenlet fejez ki. Az egyenlet alapján a viszkozitási értékeket négy különböző hőmérsékleten kiszámítva és a mért értékekkel összehasonlítva az eltérés $\log \eta = 0,04$ és $\log \eta = 0,18$ között mutatkozott. Ugyancsak lineáris összefüggést mutattak a $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$, a $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{SiO}_2$ és az $\text{Na}_2\text{O} \cdot 4\text{SiO}_2$ összetételű üvegek is a viszkozitás és a hőmérséklet között (2. ábra). Ezek után



2. ábra. Nátriumszilikát üvegek viszkozitása a reciprok abszolút hőmérséklet köbének függvényében

irodalmi adatok alapján nátronmészüvegek viselkedésének vizsgálata következett [16] és szintén lineáris összefüggést eredményezett.

A számos kutató fáradozásai tehát két, a (11) és (12) alattiaknak megfelelő egyenletet eredményeztek. Az egyik a hiperbolikus, a másik a lineáris összefüggés. A hiperbolikus egyenletben három, a lineárisban két állandó van, az előbbi tehát három, az utóbbi két meghatározott mérési eredmény ismeretét követeli meg.



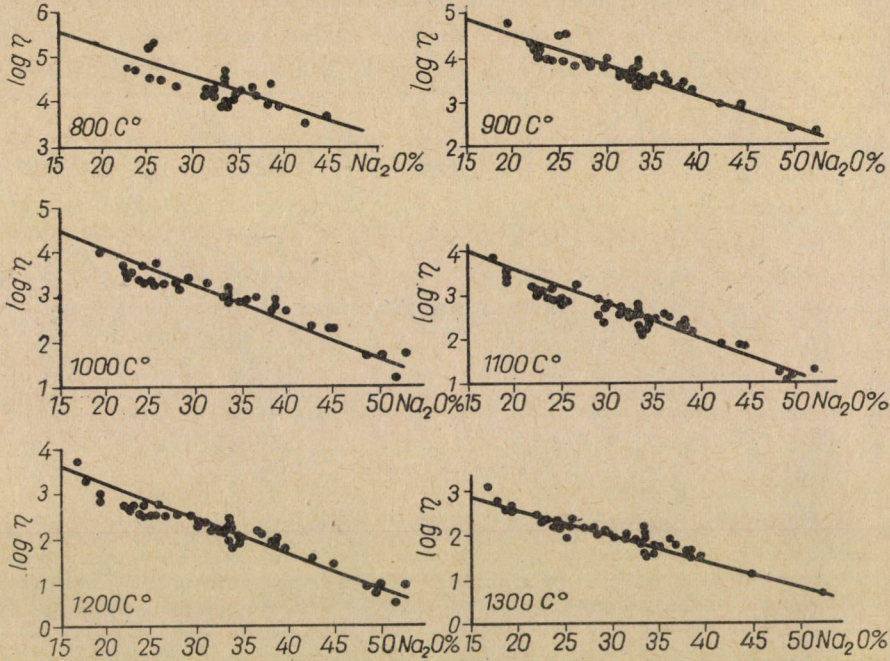
3. ábra. A viszkozitás és az Na_2O százalékos-tartalom összefüggése EIPELHAUER és JUNGK mérési alapján

A mért eredmények és a hiperbolikus, valamint a lineáris egyenletekkel számított eredmények közötti eltérést a szerző nagyszámú üvegek vizsgálata alapján állapította meg [17] és a következőket találta: maximális eltérés mindkét egyenlet alkalmazásával egyaránt $\log \eta = 0,5$; $\log \eta = 0,1$ eltérés a hiperbolikus egyenlettel számolva 85%, a lineáris egyenlet alkalmazásával 46%; $\log \eta = 0,3$ eltérés mindkét egyenlettel számítva mintegy 97%. A hiperbolikus egyenlet tehát pontosabb eredményeket ad, de $\log \eta = 0,3$ eltérést megengedve a kétféle egyenlet azonos pontossággal alkalmazható.

Egy más irányú vizsgálat EIPELHAUER és JANGG [18] megállapításának ellenőrzésére szolgált. A két kutató a nátronszilikátok izotermáit és a viszkozitás-értékeit azonos hőmérsékleten, az összetétel függvényében határozta meg és azt találta, miként azt a 3. ábra mutatja, hogy az izotermák a $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2 \text{SiO}_2$ és $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3 \text{SiO}_2$ összetételű üvegeknél mélypontot mutatnak. Ezek alapján arra következtettek, hogy az üveglvadékban ez a két vegyület mint alkotórész jelen van.

Annak megállapítására, hogy az alkálszilikátok viszkozitási izotermái alapján feltehető-e az olvadékban a di- és triszilikátvegyületek jelenléte, a szerző irodalmi adatok alapján összegyűjtötte az eddig ismeretes viszkozitásmérési adatokat [19]. A vizsgálatokat 14 kutató végezte 61 üveggel. Szerző a moloxidokra számított összetételeket olyan koordinátarendszerbe állítva vizsgálta, amelynek ordinátája a viszkozitás, abszcisszája pedig az alkáliák mól-százaléka. Az így nyert eredményeket a 4. ábrán látjuk. Az ábrák az EIPELHAUER által kapott mérési pontokat is magában foglalja. Látjuk, hogy a mérési pontok egy egyenes mentén fekszenek. A szórást az okozza, hogy a mérési

adatok más-más laboratóriumból származnak és a méréseket nem azonos készülékkel végezték. Feltételezhető tehát, hogy a diagramokban a mérési pontok közé húzott, legjobban illő egyenes a viszkozitás és a nátrontartalom közötti



4. ábra. A viszkozitás és Na_2O százalékos-tartalom összefüggése irodalmi adatok alapján

törvényszerűséget fejezi ki. Megállapítható továbbá az is, hogy az EIPELHAUER által jelzett mélypontok az eddig vizsgált mérési eredmények hibahatárai közé esnek. Ez a körülmény ellenkezik azzal a felfogással, amely szerint az üvegolvadékban a nátriumdi- és nátriumtrisilikát mint vegyület-alkotórészként van jelen.

Elméleti, de főként gyakorlati szempontból igen lényeges, hogy a viszkozitás és a vegyi összetétel között összefüggést lehessen találni és ez alapján az analitikailag megállapított vagy a keverékből számított összetételből a viszkozitás—hőfok összefüggését számítási úton meg lehessen állapítani. Az első kutatók, akik ezt a feladatot igyekeztek megoldani, GEHLHOFF és THOMAS [20] voltak, akik cseretényezőket állapítottak meg arra az esetre, ha 1% SiO_2 -t valamely más oxiddal helyettesítettek. Eljárásuk azonban több hátrányos körülménnyel kapcsolatos. Egyike ezeknek az, hogy számításuk csak akkor lehetséges, ha egy ismert összetételű üveg viszkozitási és hőmérsékleti adatai rendelkezésünkre állnak. A számítás alapjául szolgáló csereállandók továbbá nem minden százalékos mennyiségre ismeretesek, ami különösen az alkáliákra vonatkozik. Az is hátrányos, hogy a számítás menete

aránylag bonyolult és kielégítő eredményt csak akkor szolgáltat, ha a kiindulási és a számítandó üveg összetétele között nincsen nagy eltérés.

Boow és Turner [21] szintén megadott tényezőket, amelyekkel adott összetételű és viszkozitású üveg birtokában ki lehet számítani más összetételű üveg viszkozitását, ha 1% SiO_2 -t más oxid 1%-ával helyettesítünk. E számítási eljárásnak is az a hátránya, hogy alkalmazása csak bizonyos határok között lehetséges.

Egy eljárást, amellyel szilikátüvegek viszkozitási értékeit és az azokhoz tartozó hőfokokat ki lehet számítani, OHOTIN [22] dolgozott ki. Eljárásánál kiindulási üveg adataira nincs szükség. Hátránya azonban az, hogy csak abban az esetben alkalmazható, ha a számítandó üveg Na_2O , CaO , MgO és Al_2O_3 százalékos mennyisége bizonyos megadott határok között van.

A szerző célul tűzte ki, hogy a szilikátüvegek összetétele és azok viszkozitása között olyan összefüggést találjon, amelynek segítségével az összetétel alapján a viszkozitás — hőfok teljes lefutása számítás útján megállapítható. Első ízben akkor kapott eredményt, amikor az üveg összetételét a legmagasabb szilikátok és az esetleg jelen levő szabad kovasav alapján fejezte ki [23]. A

$$t [C^\circ] = ax + by + cz + du + V \quad (13)$$

egyenlettel, amelyben a , b , c és d állandók, x , y , z és u a legmagasabb szilikátok százalékos mennyisége, V pedig a szabad szilíciumdioxid százalékos mennyisége, kiszámíthatók a $\log \eta = 2$ és $\log \eta = 12$ viszkozitási értékekhez tartozó hőfokok. Ha e két számított értéket a $\log \eta - 1/T^3$ diagramba helyezzük és a két ponton át egyenest húzunk, akkor bármely viszkozitási értékhez tartozó hőfokot, vagy bármely hőfokhoz tartozó viszkozitási értéket le tudunk olvasni. Ennek az eljárásnak azonban az a hátránya, hogy az állandókat (I. táblázat) csak a diszilikátokra lehetett megállapítani, mert a mono- és triszilikátokra érvényes állandók elegendő irodalmi mérési adat hiányában nem voltak számíthatók. A számítás menete is eléggé bonyolult, ami az eljárás általános alkalmazását gátolja.

I. táblázat

Alkotórész	Állandók	
	10^2	10^{12}
	poise értékre	
$\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	6,19	4,51
CaSi_2O_5	12,3	10,41
MgSi_2O_5	21,0	17,97
BaSi_2O_5	6,4	0,3
$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	8,64	9,23
SiO_2	15,02	4,81

A kitűzött probléma megoldását tehát más úton kellett megkísérelni. Kiindulásként szerző a (12) egyenletet alkalmazta. Az irodalomból összegyűjtött adatok alapján a nátrionszilikátok A_{12} és B_{12} állandóit kiszámítva azt találta [24], hogy B_{12} a hőmérséklettel, A_{12} pedig a nátriumkoncentrációval függ össze. A kálium- és lítiumüvegekre vonatkozó számítások hasonló eredményre vezettek. E számítások alapján szerző a

$$\log \eta = A_{12} - A_{13}c + B_{12}/T^3 \quad (14)$$

egyenletet állította, fel, amelyben c az alkáliák mólban kifejezett százalékos mennyisége. Mészüvegeket vizsgálva az egyenletet még egy taggal kellett kiegészíteni, amikor is az egyenlet a következő:

$$\log \eta = A_{12} - A_{13}c_1 + A_{14}c_2 + B_{12}/T^3. \quad (15)$$

Itt c_1 a nátriumoxid és káliumoxid összegezett, c_2 a kalciumoxid mólkoncentrációja. Az állandók értékeit a II. táblázat foglalja össze. A mért és számított értékek között az eltérés logaritmikus kifejezése nátronszilikát üvegeknél 80%-ban $-0,1$ és $+0,3$ a káliszilikátoknál 95%-ban $-0,2$ és $+0,2$; lítiumszilikátoknál 90%-ban $-0,2$ és $+0,1$ és nátronszilikátoknál 94%-ban $-0,4$ és $+0,4$ között van.

II. táblázat

Mol [%]	A_{12}	A_{13}	A_{14}	B_{12}
Na ₂ O	2,3	0,057	—	5,06
K ₂ O	2,1	0,048	—	6,32
Li ₂ O	2,1	0,061	—	5,29
CaO	2,3	0,057	0,075	5,84

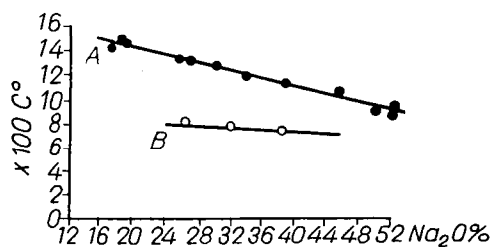
Habár a (14) és (15) egyenlet alkalmazása elfogadható eredményeket szolgáltatott, a biner és terner üvegek viszkozitás—hőfok kiszámítására még egyszerűbb egyenlet felállítása látszott célszerűnek [25]. Kiindulásként a következő gondolatmenet szolgált: általánosan elfogadott az az elmélet, hogy a kizárólag SiO₄ tetraédres elemekből álló üvegbe bevitt Na₂O Na⁺-ionjai a hálózat üregeibe kerülnek, az O²⁻-ion pedig egy —Si—O—Si— kötést megbont és nemhídkötésű. Minél több Na⁺-ion kerül a kizárólag SiO₄ tetraéder elemekből álló kvarcüvegbe, annál több a nemhídkötő oxigénionok száma és annál lazább a szerkezet. Adott viszkozitási értéknek megfelelő hőmérséklet és a nátrium-, illetve alkálitartalom között e szerint lineáris összefüggésnek kell fennállnia. Hogy ezt az összefüggést meg lehessen találni, azokat a hőfokadatokat, amelyek a biner és terner nátronüvegeknél $\log \eta = 2$ és $\log \eta = 5$ viszkozitásoknak felelnek meg, össze kellett gyűjteni (III. táblázat)

III. táblázat

Na ₂ O%	t ₁ log η = 2			t ₂ log η = 5		
	mért	számított	különbség [%]	mért	számított	különbség [%]
15,6	1450	1484	+2,3	—	—	—
19,6	1500	1467	-2,2	—	—	—
20,1	1500	1458	-3,0	—	—	—
26,4	1360	1349	-1,0	830	835	+0,5
29,9	1305	1292	-1,0	—	—	—
34,0	1250	1222	+1,8	—	—	—
34,0	1300	1222	-6,3	780	762	-2,3
34,0	1190	1222	+2,6	760	762	0
34,0	1310	1222	-6,5	750	762	+0,5
39,3	1160	1159	0	—	—	—
39,3	1180	1159	-2,8	750	752	0
39,4	1170	1157	-1,4	740	751	+1,5
46,5	1060	1009	-5,0	—	—	—
49,5	940	958	+1,8	—	—	—
50,5	945	941	-0,4	—	—	—
52,1	900	915	+1,6	—	—	—
52,1	940	915	-2,6	—	—	—

és be kellett helyezni egy Na₂O — t₂ és Na₂O — t₅ diagramba (5. ábra). Mindkét esetben a mérési pontok egy egyenes mentén fekszenek. Ugyanezt a műveletet elvégezve kálszilikát üvegekre (6. ábra) az adódott ki, hogy a hőmérséklet a

$$t = A_{15} + B_{13} x \quad (16)$$



5. ábra. A log η = 2 (A) és log η = 5 (B) értékeknek megfelelő hőfokok a Na₂O% függvényében

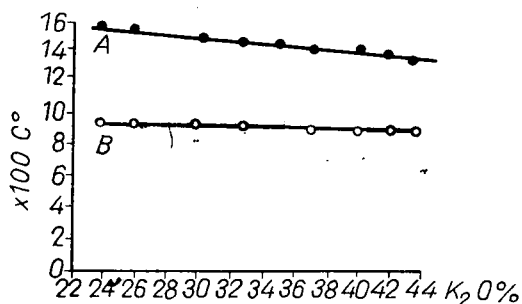
egyenlettel fejezhető ki, ahol x az Na₂O% és t jelentése t₂ vagy t₅.

Ha a biner üvegekbe egy harmadik bivalens vagy trivalens oxidot olvasztunk be, akkor a hőmérsékletet a

$$t = A_{15} B_{13} (x + y) + C \quad (17)$$

egyenlettel sikerült kifejezni, ahol y a CaO , MgO , BaO_3 vagy Al_2O_3 százalékos mennyisége Az állandókat a IV. táblázat foglalja össze.

Miután a (16), illetve (17) egyenlettel a megadott állandók segítségével a t_2 és t_5 hőfokok értékei kiszámíthatók, a teljes viszkozitás—hőfok össze-



6. ábra. A $\log \eta = 2$ (A) és $\log \eta = 5$ (B) értékeknek megfelelő hőfokok a $\text{K}_2\text{O}\%$ függvényében

függést ki lehet fejezni a (12) egyenlettel. Ugyanez a cél elérhető a (11) egyenlettel is, akkor azonban három t értékre kell az állandókat megállapítani, ami az eljárást bonyolultabbá és hosszadalmasabbá teszi.

IV. táblázat

Oxid	t_2 hőfoknál			t_5 hőfoknál		
	A_{15}	B_{15}	C	A_{15}	B_{15}	C
Na_2O	1800	—17	—	1000	—7	—
K_2O	1800	—17	—	1000	—3,4	—
CaO	1650	—17	24	950	—7	14,5
MgO	1750	—17	13	1000	—7	11
B_2O_3	1640	—17	5	980	—7	5
Al_2O_3	1700	—17	9	980	—7	12

Kvaterner üvegek t_2 és t_5 értékeit jelenleg nem lehet kiszámítani, mert erre a célra elegendő mérési adattal nem rendelkezünk.

IRODALOM

1. KNAPP, O.: *MTA VI. Oszt. Közl.* 21 (1957), 51.
2. LE CHATELIER, H.: *J. Soc. Glass Techn.* 9 (1925), 12.
3. MOREY, G. W.: *The Properties of Glass*, 1938.
4. PRESTON, E.: *J. Soc. Glass Techn.* 13 (1929), 19.
5. POOL, P.: *Glass Industry* 40 (1949), 19.
6. LILLIE, H. R.: *Proc. Intern. Congr. on Glass* (1955), 11.
7. DE GUZMAN, J.: *J. Anal. Soc. Esp. Fis. Quim.* (1913), 353.
8. FRENKEL, J.: *Kinetic Theory of Liquids*, 1946.
9. EYRING, H.: *The Theory of Rate Process*, 1941.

10. DOUGLAS, R. W.: *J. Soc. Glass Techn.* **33** (1949), 6.
11. KITAIGORODSZKIJ, I. I.: *Üvegtechnológia*, 1954.
12. ОХОТИН, М. В.: *Стекло и Керамик* (1950), 6.
13. WADLEIGH, W. H.: *Bur. of Stand.* **7** (1933), 65.
14. FULCHER, S. S.: *J. Amer. Ceram. Soc.* **8** (1925), 339.
15. KNAPP, O.: *Építőanyag* **6** (1954), 198.
16. KNAPP, O.: *Glastechn. Ber.* **31** (1958), 94.
17. Még nem közölt adatok.
18. EIPELHAUER, E.—JUNGG, G.: *Kolloid Zeitschr.* (1955), 81.
19. KNAPP, O.: *Építőanyag* **9** (1957), 310.
20. GEHLHOFF, G.—THOMAS, M.: *Zeitschr. f. techn. Physik* (1926), 105.
21. BOOW, J.—TURNER, W. E. S.: *J. Soc. Glass Techn.* (1942), 215.
22. ОЛХОТУН, М. В.: *Стекло и Керамик* (1954), 7.
23. KNAPP, O.: *MTA VI. Oszt. Közl.* **15** (1955), 457.
24. KNAPP, O.: *Glastechn. Ber.* **33** (1960), 338.
25. KNAPP, O.: *Glas-Email-Keramo-Techn.* **18** (1967), 52.