

DISTRIBUȚIA TEMPERATURII ÎN TOPITURA DE STICLĂ. INFLUENȚA GRADULUI DE IZOLARE A VANEI CUPTORULUI

TEMPERATURES DISTRIBUTION IN GLASS MELT- INFLUENCE OF ISOLATION DEGREE OF GLASS TANK BASIN

The optimal depth of the glass melting tanks is calculated as a function of glass-type, surface temperature of glass melt and characteristics of the melting zone walls and hearth.

In the paper there are presented the results obtained for several situations of practical interests. So thermal and hydrodynamic characteristics of glass melt flow for melting zone are determined when the basin depth and the basin thermal resistance is varied.

ТЕРМИЧЕСКИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАВЛЕННОГО СТЕКЛА В ВАНИХ ПЕЧАХ

Оптимальная глубина стекловаренной печи рассчитана в зависимости от типа стекла, температуры поверхности стекла и от характеристик стен и пода в зоне плавления.

В статье представлены ряд результатов, полученные для ситуаций практического интереса. Таким образом определяется способ изменения термических характеристик и гидродинамических стекляных потоков в зоне плавления в зависимости от глубины бассейна и степени изолирования его пода.

1. Introducere

Cuptoarele vană reprezintă sisteme termotehnologice integrate, caracterizate de un mare număr de parametri termotehnologici care se interconstrucionează. Funcțiile de performanță pentru aceste cuptoare sînt în mare măsură determinate de modul în care decurge schimbul complex de căldură în spațiul lor de lucru. În mod formal acesta poate fi împărțit în mai multe subsisteme (S_i). Transferul termic se desfășoară într-un mod particular pentru fiecare subsistem, după cum urmează:

- în subsistemul S_1 - reprezentînd spațiul gazelor de combustie - transferul termic se face prin radiație și convecție între gaze calde - material și gaze calde - pereți, precum și prin radiație între pereți și suprafața topiturii;

- în subsistemul S_2 - delimitînd volumul de topitură din bazinul cuptorului - transferul termic se face prin convecție, conducție și radiație;

- în subsistemul S_3 - incluzînd pereții cuptorului - transmiterea căldurii se face prin conducție.

În lucrare se vor face unele referiri la subsistemul S_2 urmărindu-se relevarea influențelor rezistenței termice a vetrei și adîncimii cuptorului asupra distribuției temperaturilor în topitură.

2. Baza teoretică

2.1. Transferul termic în topituri de sticlă

Problema modului în care se transferă căldura în topituri de sticlă a fost și este discutată de mai multe decenii în literatura de specialitate. În mod principial se acceptă că transmisia căldurii se face prin convecție, conducție și radiație. În același timp, ținînd cont că în bazinul de topire al cuptoarelor vană viteza curenților este relativ mică, de ordinul metrilor pe oră, se obțin în general valori ale numărului

Reynolds subunitare. Rezultă de aici că transferul de căldură convectiv are o contribuție practic neglijabilă în cazul topiturilor de sticlă.

De asemenea, de mai mult timp s-a evidențiat experimental că transportul căldurii în topitura de sticlă prin conducție este de importanță secundară. Astfel, variația coeficientului de conductivitate termică λ_c cu temperatura, pentru cea mai mare parte a sticlelor industriale este descrisă de relația:

$$\lambda_c = 1,125 + 6,25 \cdot 10^{-4} \cdot t \quad [W/m \cdot K] \quad (1)$$

în care t este temperatura medie a topiturii în $^{\circ}C$.

Din relația (1) se relevă că valorile maxime uzuale pentru λ_c sînt de circa 2 W/m.K. Ori, măsurătorile pe cuptoarele industriale au arătat că transferul termic în masa de topitură este mult mai intens. Explicația rezidă în faptul că la temperaturile de lucru uzuale din cuptorul vană, transmiterea căldurii se face în topitură prin radiație, fiecare element de volum avînd simultan rolul de absorbant și de emitor de radiații. Avînd în vedere legea radiației a lui Planck și ținînd cont că în orice punct din volumul de topitură energia internă (căldura sensibilă) se transformă în energie de radiație, pentru densitatea de putere spectrală a acestei transformări energetice se scrie relația:

$$q_{\nu} = 4 \cdot \Pi \cdot \alpha_{\nu} \cdot n_{\nu}^2 \cdot \frac{2 \cdot h \cdot \nu^3}{c_0 \cdot (e^{h\nu/kT} - 1)} \quad (2)$$

în care α_{ν} este coeficientul de absorbție al sticlei; n_{ν} - indicele de refracție la frecvența ν ; c_0 - viteza luminii în vid; h - constanta lui Planck; k - constanta lui Boltzmann; ν - frecvența radiației; T - temperatura.

Pentru a calcula densitatea de energie a cîmpului de radiații în vederea stabilirii coeficientului de transfer termic radiativ trebuie să se integreze relația (2). Dar, chiar considerînd că n_{ν} este independent de frecvența radiației (deci n_{ν}

=n = const.) integrarea nu se poate face decit în anumite cazuri particulare, prin metode numerice. O astfel de cale adoptă Geffcken care rezolvă o relație integrală pentru a calcula densitatea de flux termic ce se transmite printr-un volum de topitură. [1]

În mod obișnuit, în calculele uzuale se utilizează un așa numit coeficient de conductibilitate prin radiație, λ_r , introdus de Czerny și Genzel, [2] care se calculează cu relația:

$$\lambda_r = (16/3) \cdot \sigma \cdot n^2 \cdot T^3 \cdot F(T) \quad (3)$$

în care σ este constanta Stephan - Boltzmann; n - indicele de refracție al topiturii de sticlă; T - temperatura absolută a topiturii; $F(T)$ - este o funcție avînd semnificația drumului liber al radiației (valoric reprezintă inversul coeficientului de absorbție).

Relația (3) se obține în anumite ipoteze simplificatoare dintre care cele mai importante pot fi: coeficientul de absorbție al sticlei este independent față de frecvența radiației; grosimea stratului de topitură este suficient de mare ca efectele de margini să fie neglijate.

În aceste condiții, cu o anumită aproximație, transferul de căldură prin topitură poate fi descris printr-un coeficient de "conductivitate termică efectivă" λ_{eff} care se calculează cu relația:

$$\lambda_{eff} = \lambda_c + \lambda_r \quad (4)$$

De remarcat că în [2] se indică dependența lui λ_{eff} de temperatură pentru o serie de sticle industriale. Dificultățile de a măsura precis acest coeficient de transfer termic la temperaturi ridicate este reflectată și de dispersia mare a datelor prezentate, ceea ce impune o anumită prudență la utilizarea lor. De remarcat că în [2] se indică o dependență parabolică între λ_{eff} și T .

Relația (3) oferă posibilitatea de a se determina profilul temperaturii în volumul topiturii atît timp cît efectele de margini datorate interfețelor topitură-gaze de ardere și topitură-refracție pot fi neglijate. În realitate se înregistrează o schimbare a monotoniei variației temperaturii în volume de topituri aflate la distanțe de suprafețele limită comparabile cu "parcursul liber mijlociu" al radiației termice. În [3] se apreciază, pe baza mai multor date raportate în literatură că grosimea stratului limită poate fi apreciată la 0,2-0,3 m. Descrierea exactă a fluxului de radiație în apropierea suprafețelor limită se poate obține prin rezolvarea unor ecuații integro-diferențiale care presupune un efort de calcul relativ ridicat. Cu o aproximație relativ bună densitatea de flux termic Φ , temperaturile reale la interfețe $T(0)$ și $T(H)$ se pot determina cu relațiile:

$$\Phi \approx k_1 \cdot \frac{4 \cdot \sigma \cdot n^2}{4 + 3 \cdot H/F(T_m)} \cdot (T_0^4 - T_H^4) \quad (5)$$

$$T^A(0) \approx T_0^A - \frac{\Phi}{2 \cdot \sigma \cdot n^2 \cdot k_2} \quad (6)$$

$$T^A(H) \approx T_H^A + \frac{\Phi}{2 \cdot \sigma \cdot n^2 \cdot k_3} \quad (7)$$

în care $T_m = (T_0 + T_H)/2$.

În relațiile (5)-(7), propuse de Czerny și Genzel [1] - în care $k_1 = k_2 = k_3 = 1$ - se folosesc valorile $k_1 = 0,9$; $k_2 = 2,1$; $k_3 = 2,4$ care aproximează - conform datelor prezentate în [1] - pentru $H = 0,9 \dots 1,5$ m - valorile calculate pe această cale cu

cele obținute prin rezolvarea riguroasă a ecuațiilor integro-diferențiale care descriu transferul termic radiativ.

2.2. Circulația topiturii în cuptoarele vană

Circulația topiturii în bazinul de topire al cuptoarelor vană este deosebit de complexă și este determinată de: caracteristicile fizico-chimice ale amestecului de materii prime, regimul termic al gazelor de ardere, geometria și dimensiunile bazinului de topire, gradul de izolare al pereților, condițiile de exploatare etc.

Studiul hidrodinamic al topiturii de sticlă are drept scop stabilirea vitezei, grosimii și debitului pentru curenții care se formează în diferite zone. În acest sens, există un număr relativ mare de date raportate în literatură obținute prin modelare fizică și/sau matematică, în acest ultim caz fiind necesară, în general, impunerea unor ipoteze mai mult sau mai puțin restrictive. Pe baza unui model simplificat, Solinov propune în [4], o serie de relații pentru caracterizarea curenților, prezentate în tabelul 1. Pe baza acestor relații și ținînd cont de transferul termic în topitura de sticlă se poate stabili influența adîncimii bazinului și a gradului de izolare al vetrei (respectiv a rezistenței ei termice R_t) asupra caracteristicilor curenților. În lucrare se evaluează influențele acestor caracteristici constructive asupra grosimii curenților.

3. Caracteristici termice și de curgere ale sticlei topite

3.1. Influența adîncimii bazinului asupra distribuției temperaturii în topitură

Sînt posibile mai multe căi de abordare a problemei stabilirii tipului de distribuție a temperaturii în sticla topită. Una din modalități, fără a fi cea mai riguroasă, dar oferind date suficient de precise pentru scopul urmărit aici, are la bază relația (5). Astfel, ținînd cont de conservarea fluxului termic care se transmite prin topitură și avînd în vedere două grosimi diferite, $x = \Delta x$ și $x = H$, rezultă relațiile succesive:

$$\Phi_x = \Delta x = \Phi_{x=H} \quad (8)$$

$$T_x = [T_0^4 - (T_0^4 - T_H^4) \cdot f(x)]^{1/4} \quad (9)$$

în care $f(x)$ se scrie:

$$f(x) = \frac{4 + 3 \cdot \Delta x/F(T | \Delta x)}{4 + 3 \cdot H/F(T | H)} \quad (10)$$

Relațiile (8)-(10) sînt folosite în continuare pentru a stabili distribuția temperaturilor în topitura de sticlă acoperită cu amestec de materii prime.

3.2. Influența gradului de izolare al vetrei asupra adîncimii maxime a bazinului.

Considerînd că prin condițiile inițiale se cunoaște distribuția temperaturii în lungul axei longitudinale al cup-torului, transferul termic de la topitură la refractarul vetrei și prin aceasta spre mediul ambiant este dat de relațiile care reprezintă condițiile la limită respective:

$$\lambda_{eff} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_r \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (11)$$

$$\lambda_r \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \cdot (T_e - T_a) \quad (12)$$

în care λ_r reprezintă conductivitatea termică a peretelui refractar, în $W/m \cdot K$; α - coeficientul de transfer termic de la vatră la mediul ambiant în $W/m^2 \cdot K$; T_e , T_a - temperatura suprafeței exterioare a peretelui, respectiv a mediului ambiant, în K. Datele de literatură indică o aproximație liniară a lui α în funcție de T_e .

Pentru calculul coeficientului de conductivitate termică efectivă λ_{eff} se pot folosi relațiile (1), (3), (4) în care dependența de T este implicită sau relații statistice empirice care au avantajul că dau în mod explicit corelația între cele două mărimi. O astfel de relație, prezentată în [2] și folosită în lucrare este:

$$\lambda_{eff} = 5,386 - 0,021676 \cdot T_x + 0,00002058 \cdot T_x^2 \quad [W/mK] \quad (13)$$

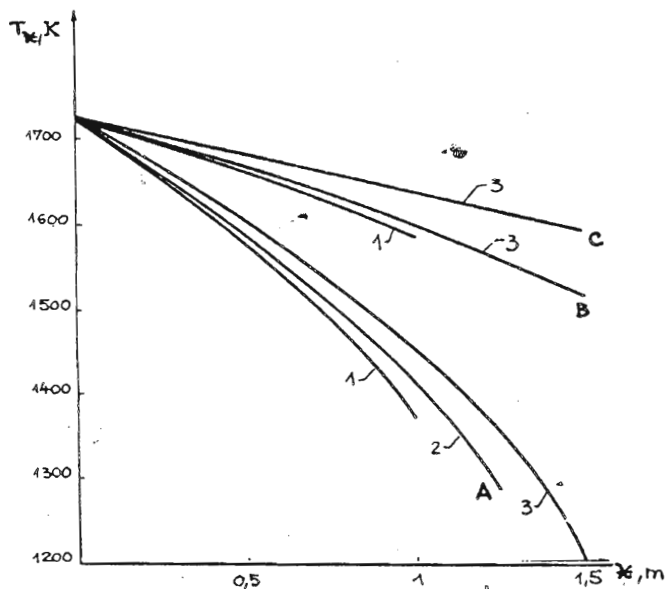


Fig. 1. Variația temperaturii stratului de sticlă în funcție de grosimea curentului de sticlă la diferite rezistențe termice ale vetrei: A- $R_t=0,1$ $W \cdot m^2/K$, B- $R_t=0,3$ $W \cdot m^2/K$ și C- $R_t=0,5$ $W \cdot m^2/K$ la diferite adâncimi ale bazinului: 1- $H=1$ m; 2- $H=1,25$ m și 3- $H=1,5$ m.

Variation of glass layer temperature as function of glass layer thickness for different thermal resistances of basin: A- $R_t=0,1$ $W \cdot m^2/K$, B- $R_t=0,3$ $W \cdot m^2/K$ and C- $R_t=0,5$ $W \cdot m^2/K$ at different basin depth: 1- $H=1$ m; 2- $H=1,25$ m and 3- $H=1,5$ m.

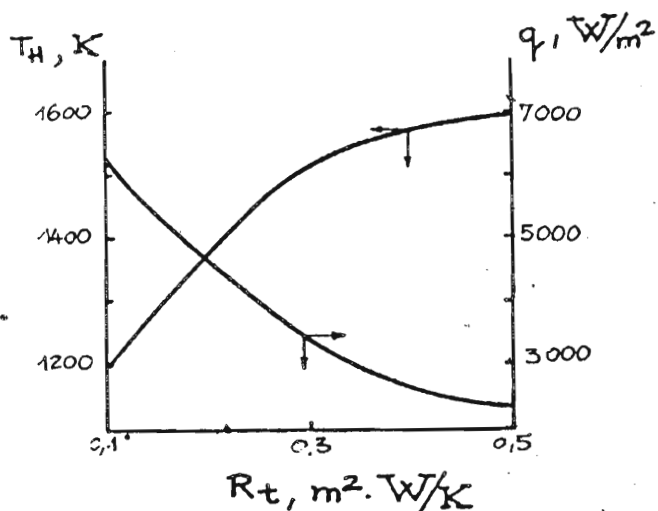


Fig. 3. Variația temperaturii vetrei bazinului (T_H) și a fluxului termic (q) în funcție de rezistența termică R_t (la $H=1,5$ m).

Alteration of both basin hearth temperature (T_H) and thermal flow variation (q) as function of thermal resistance R_t (for $H=1,5$ m).

în care temperatura T_x , în K, este temperatura medie a topiturii la adâncimea x , în m.

În lucrare s-a avut în vedere o sticlă albă, silico-calcosodică pentru care temperatura T_0 la suprafața liberă s-a considerat 1723 K. În acest caz, pe baza relațiilor (8)-(13) s-a determinat modul în care rezistența termică R_t a vetrei și adâncimea efectivă H a bazinului de topire influențează distribuția temperaturilor T_x la diferite distanțe x față de oglinda sticlei. În figura 1 se prezintă rezultatele de interes practic pentru cîte trei valori diferite pentru R_t și H .

Totodată, în figura 2 se indică variația densității de flux termic q , în W/m^2 , ce se transmite prin zidărie la mediul ambiant în funcție de adâncimea bazinului în cazul în care acesta este în mod diferit izolat. Pe același grafic se indică și temperatura T_H pe care topitura o are la contactul cu vatra.

În sfîrșit, în figura 3 se indică dependența parametrilor q și T_H de gradul de izolare al vetrei reflectat de diferitele valori

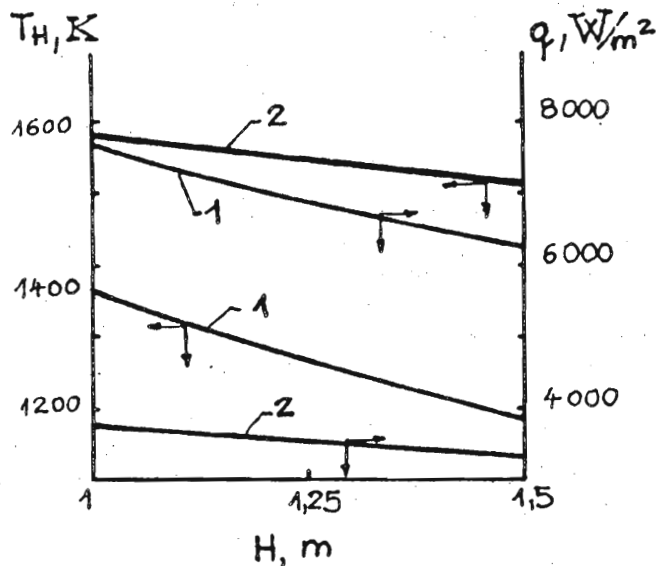


Fig. 2. Variația temperaturii vetrei bazinului (T_H) și a fluxului termic (q) în funcție de adâncimea bazinului (H) la: 1- $R_t=0,1$ $W \cdot m^2/K$ și 2- $R_t=0,3$ $W \cdot m^2/K$.

Variation of both basin hearth temperature (T_H) and the thermal flow (q) versus basin depth (H) for: 1- $R_t=0,1$ $W \cdot m^2/K$ and 2- $R_t=0,3$ $W \cdot m^2/K$.

ale rezistenței ei termice, R_t .

Rezultatele obținute par a fi într-o bună corelație cu unele date raportate în literatură, referitoare la cuptoare anologice în funcțiune [2]. Trebuie remarcat faptul că, atunci cînd temperatura T_H a topiturii se impune din considerente tehnologice pe baza graficelor din figurile 1-3 se poate stabili adâncimea maximă admisibilă a bazinului de topire pentru un anumit grad de izolare al acestuia.

3.3. Influența adâncimii bazinului asupra grosimii curenților

Este de așteptat ca adâncimea bazinului de topire și/sau a rezistenței termice a vetrei să conducă la unele modificări în hidrodinamica sticlei topite. În tabelul 1 se indică după [4] relațiile finale de calcul pentru o serie de caracteristici ale curenților ce se formează în bazinul cuptorului: grosime, viteza și debitul. Se au în vedere curentul superior și curentul inferior, atît în prima zonă a cuptorului, în care topitura este acoperită cu amestec pulverulent, cît și în cea de-a doua zonă în care suprafața topiturii este liberă.

Un program de calcul elaborat în limbaj BASIC și rulat pe un calculator HC 85 a permis obținerea datelor ce corelează

Parametrii curentilor
Flow parameters

Parametrii Parameters	Curentul superior Upper flow		Curentul inferior Lower flow
	Suprafața neacoperită Upper uncovered surface	Suprafața acoperită Upper covered surface	
Grosimea Thickness	$H_1 = \frac{H}{1 + \sqrt{\frac{5 \cdot \eta_2 \cdot (t_1 - t_2)_1}{\eta_1 \cdot (t_1 - t_2)_2}}}}$	$H_1 = \frac{H}{1 + \sqrt{\frac{\eta_2 \cdot (t_1 - t_2)_1}{\eta_1 \cdot (t_1 - t_2)_2}}}}$	$H_2 = H - H_1$
Viteza maximă Maximum rate	$w_{1max} = \frac{(t_1 - t_2) \cdot 1H_1^3}{18 \cdot \eta_1 \cdot l}$	$w_{1max} = \frac{(t_1 - t_2) \cdot 1H_1^3}{93,5 \cdot \eta_1 \cdot l}$	$w_{1max} = \frac{(t_1 - t_2) \cdot 2H_1^3}{93,5 \cdot \eta_2 \cdot l}$
Viteza medie Medium rate	$w_1 = 0,625 \cdot w_{1max}$	$w_1 = 0,645 \cdot w_{1max}$	$w_2 = 0,645 \cdot w_{2max}$
Debit Output	$V_1 = w_1 \cdot B \cdot H_1$	$V_1 = w_1 \cdot B \cdot H_1$	$V_2 = w_2 \cdot B \cdot H_2$

H - grosimea cuptorului; H_1, H_2 - grosimea curentului superior, respectiv inferior; B - lățimea curentului; η - viscozitatea topiturii de sticlă; l - lungimea curentului; t_1 - temperatura maximă a zonei; t_2 - temperatura minimă a zonei; *indicii*: 1 - pentru curentul superior; 2 - pentru curentul inferior.

H - depth of the tank; H_1, H_2 - thickness of the upper, respectively lower flow; B - breadth of the flow; η - viscosity of the glass melt; l - length of the flow; w - rate of the flow; t_1 - maximum temperature zone; t_2 - minimum temperature zone; the indexes: 1 - for the upper flow; 2 - for the lower flow.

grosimea curentului superior (H_1) respectiv inferior (H_2) cu tipul de sticlă elaborată, adâncimea și gradul de izolare al bazinului de topire, atât în zona de alimentare (acoperită cu amestec), cât și în zona de afinare.

În lucrare se prezintă rezultatele referitoare la sticla albă considerată. Astfel, în figura 4 și 5 se indică variația grosimilor celor doi curenți ce se formează în topitura de sticlă având oglinda liberă, precum și a raportului lor, în funcție de adâncimea efectivă a bazinului. După cum era de așteptat, atât H_1 cât și H_2 cresc pe măsură ce H este mai mare. În același timp, raportul H_1/H_2 se micșorează ceea ce poate avea influențe negative asupra timpului mediu de retenție al topiturii în bazin.

Datele prezentate în figurile 1-5 sugerează faptul că stabilirea adâncimii bazinului de topire al cuptoarelor vană este o problemă complexă, la rezolvarea căreia trebuie să se țină seama concomitent, atât de aspectele termice, cât și de cele de curgere, referitoare la topitura de sticlă.

4. Concluzii

Distribuția temperaturii în topitura de sticlă este în mod important corelată cu caracteristicile constructive ale cuptorului. În plus, aceasta influențează - direct și indirect - caracteristicile de curgere ale curenților de topitură. Este de așteptat ca acumularea de cât mai multe date referitoare la astfel de corelații să furnizeze idei noi privind proiectarea și exploatarea optimă a cuptoarelor vană, în special în ceea ce privește adâncimea bazinului de topire.

BIBLIOGRAFIE

1. Czerny, M. & Genzel, L. Glastechn. Ber. 25, (1952)
2. Ungan, A. Glastechn. Ber. 60, (4), (1987)
3. Siegel, R. & Howell, J. "Thermal Radiation Heat Transfer" McGraw Hill, New York, (1981)
4. Solinov, F. "Proizvodstvo listivogo stecla", Stroizdat, Moskva, (1976)

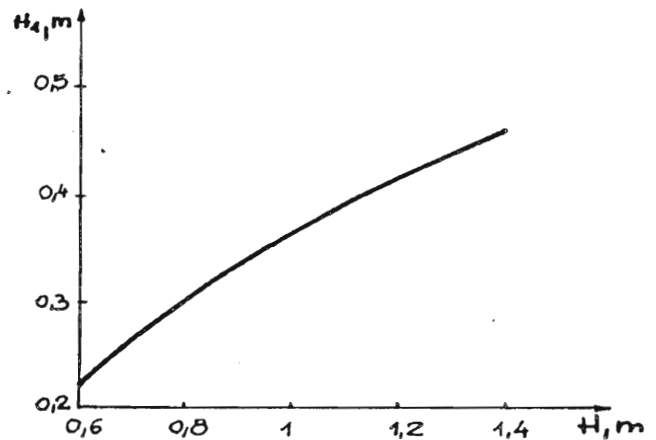


Fig. 4. Variația grosimii curentului superior (H_1) în funcție de adâncimea bazinului.

Variation of upper flow thickness (H_1) versus basin depth.

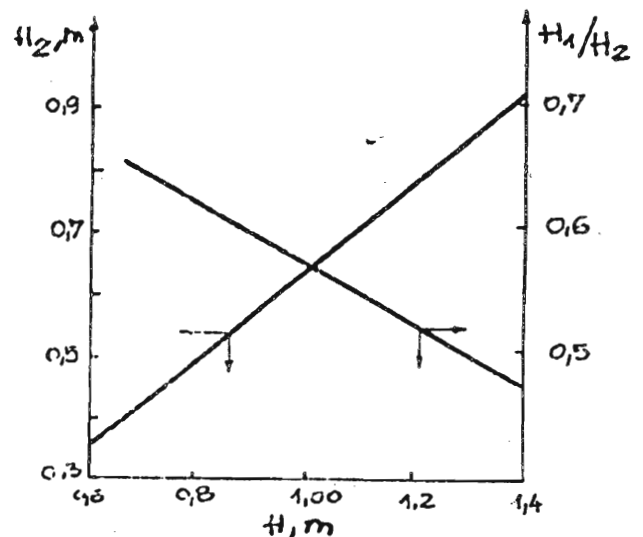


Fig. 5. Variația grosimii curentului inferior (H_2) și a raportului H_1/H_2 în funcție de adâncimea bazinului.

Variation of lower flow thickness (H_2) and H_1/H_2 ratio versus basin depth.