

1139.825

Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați



Facultatea de Mecanică



TEZĂ DE DOCTORAT

**CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE
PRIVIND CÂMPUL DE TEMPERATURĂ ÎN
PISTA PATINOARULUI**

- REZUMAT -

Doctorand:
Ing. Gelu COMAN

Conducător științific:
Prof.Dr.Eng. Tănase PANAIT

GALAȚI
2011

II 39.82J

ROMANIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII, TINERETULUI ȘI SPORTULUI
UNIVERSITATEA DUNĂREA DE JOS DIN GALAȚI

Strada Domnească nr. 47, cod poștal 800008
Galați, România
E-mail: rectorat@ugal.ro



Tel.: (+4) 0336-130.109; 0336-130.108; 336-130.104
Fax: (+4) 0236-461.353
www.ugal.ro

07459/208.201

Către

Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați vă face cunoscut că în data de 7.10.2011,
ora 11, în 5102 a Facultății de Mecanică,
va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată : "CERCETĂRI TEORETICE ȘI
EXPERIMENTALE PRIVIND CÂMPUL DE TEMPERATURĂ ÎN PISTA PATINOARULUI"
elaborată de domnul/doamna ing. COMAN GELU, în vederea conferirii titlului științific de doctor în
Domeniul de doctorat - Inginerie mecanică.

Comisia de doctorat are următoarea componență :

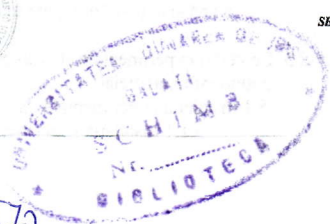
- 1. Presedinte:** Prof.univ.dr.ing. Cătălin FEȚECĂU
Decan - Facultatea de Mecanică
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
- 2. Conducător de doctorat:** Prof.univ.dr.ing. Tănase PANAIT
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
- 3. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Alexandru DOBROYCESCU
Universitatea POLITEHNICA București
- 4. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Gheorghe DUMITRASCU
Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași
- 5. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Valeriu DAMIAN
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați

Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat și vă invităm să participați la susținerea publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm să le transmiteți în scris pe adresa Universității, str. Domnească nr. 47, 800008 - Galați, Fax - 0236 / 461353.

RECTOR,
Prof.dr.ing. Viorel MÎNZU

SECRETAR DOCTORAT,
Ing. Lăuza AXINTE

L.A. Ximite



266.577

CUPRINS (teza de doctorat)

Notății și simboluri.....	1
Introducere.....	4
Capitolul 1. Noțiuni teoretice privind construcția patinoarelor artificiale.....	5
1.1 Considerații generale.....	5
1.2 Studii privind construcții existente de patinoare și soluții de modernizare.....	5
1.2.1 Patinoarul acoperit de la Miercurea Ciuc.....	5
1.2.2 Patinoarul descoperit de la Miercurea Ciuc.....	12
1.2.3 Patinoarul descoperit de la Constanța.....	16
Capitolul 2. Elemente constructive și relații de calcul pentru pista patinoarului.....	20
2.1 Elemente constructive ale pistei patinoarului.....	20
2.2 Sistemul de răcire al pistei patinoarului.....	22
2.3 Distribuția optimă a fascicolului de țevi și determinarea necesarului de frig pentru patinoare artificiale.....	25
2.3.1 Distribuția optimă a fascicolului de țevi.....	25
2.3.2 Stabilirea necesarului de frig.....	29
Capitolul 3. Studiul procesului de solidificare unidirecțională cu ajutorul schemelor cu diferențe finite.....	34
3.1 Considerații generale.....	34
3.2 Metode cu diferențe finite pentru analiza teoretică a solidificării în exteriorul unui perete plan.....	40
3.2.1 Relații de aproximare prin polinoame de gradul II a gradientilor domeniilor și scrierea ecuațiilor de conservare.....	55
3.3 Aplicarea metodelor cu diferențe finite bazate pe rețele cu prag variabil în analiza teoretică a solidificării în exteriorul unui perete cilindric.....	72
3.3.1 Ecuațiile schemei implicite cu diferențe finite.....	74
3.4 Rezultate numerice.....	84
3.4.1 Cazul perete plan.....	85
3.4.2 Cazul perete cilindric.....	88
Capitolul 4. Studiul procesului de solidificare în pista patinoarului artificial cu ajutorul metodei elementului finit.....	92
4.1 Metode numerice pentru modelarea schimbării de fază.....	92
4.2 Modelarea numerică a transferului de căldură cu schimbare de fază în regim nestaționar prin metoda elementului finit.....	95
4.2.1 Realizarea geometriei și discretizarea domeniilor analizate.....	95
4.3 Rezultate numerice în cazul țevii scufundate în apă.....	100
4.4 Rezultate numerice în cazul țevii îngropate în nisip.....	121
4.5 Rezultate comparative privind câmpul de temperaturii în jurul țevii scufundate în apă și al țevii îngropate în nisip.....	136
Capitolul 5. Cercetări experimentale ale câmpului de temperatură în jurul țevilor pistei patinoarului artificial.....	139
5.1 Instalația experimentală.....	139
5.1.1 Instalația frigorifică.....	139

5.1.2 Pista patinoarului.....	142
5.1.3 Circuitul de agent intermediar.....	144
5.1.4 Sistemul de măsurare al temperaturii.....	144
5.1.5 Poziționarea termocuplelor.....	149
5.2 Rezultate experimentale.....	151
5.2.1 Faza I – țeavă scufundată în apă.....	151
5.2.2 Faza II – țeavă îngropată în nisip.....	155
5.2.3 Rezultate comparative între Faza I și Faza II.....	159
5.3 Măsurarea temperaturii la suprafața pistei prin termografere.....	162
Capitolul 6. Rezultate comparative între cercetările experimentale și modelarea numerică cu element finit.....	169
6.1 Rezultate comparative pentru țeava scufundată în apă.....	169
6.2 Rezultate comparative pentru țeava îngropată în nisip.....	173
Concluzii finale și perspective.....	176
Bibliografie.....	179
Anexe.....	185

1. Introducere

Pe plan mondial se poate vorbi de o utilizare la scară industrială a instalațiilor frigorifice doar cu circa 150 de ani în urmă, când Ferdinand Carre, cel mai mare nume al istoriei frigului, a realizat prima instalație frigorifică prin absorbție cu funcționare continuă. Apoi, într-un interval de timp relativ scurt tehnica frigului cunoaște o dezvoltare extraordinară de rapidă, cerută de progresul general al industriei, care necesită, în multe domenii, temperaturi scăzute.

Este greu să ne imaginăm că, în prezent, am mai putea trăi fără aplicațiile tehnicii frigului în industria alimentară. Să ne gândim, cum ar fi posibilă aprovizionarea corespunzătoare cu produse alimentare, în decursul unui an calendaristic, a marilor orașe ale lumii, care au milioane și chiar zeci de milioane de locuitori.

Dar industria alimentară nu este singurul mare consumator de frig artificial. Industria chimică necesită puteri frigorifice mari și foarte mari, situate într-o gamă largă de temperaturi, de la cele pozitive, cuprinse între 0..15 °C, ajungând la temperaturi foarte scăzute, corespunzătoare lichefierii diverselor gaze ca: oxigen, azot etc.

O aplicație deosebit de importantă, dar și spectaculoasă prin dimensiunile ei o constituie înghețarea terenurilor acifere în vederea realizării diferitelor lucrări ca: puțuri de mină, galerii pentru liniile de metrou, lucrări portuare etc. Dar cum am putea oare accepta să fim lipsiți, chiar și numai pentru puțin timp, de fascinatele spectacole organizate pe luciul patinoarelor artificiale. Un patinoar artificial presupune însă existența unei instalații frigorifice care asigură formarea și menținerea stratului de gheață.

Teza este structurată pe 6 capitole, fiind completată cu anexe și referințe bibliografice din literatura de specialitate.

Capitolul 1 – Noțiuni teoretice privind construcția patinoarelor – prezintă măsurile de reabilitare pentru trei patinoare artificiale și anume patinoarul acoperit de la Miercurea Ciuc, patinoarul descoperit de la Miercurea Ciuc și patinoarul descoperit de la Constanța.

Capitolul 2 – Elemente constructive și relații de calcul pentru pista patinoarului - prezintă pe larg elementele constructive ale pistei patinoarului, sistemul de răcire al patinoarului, distribuția optimă a fascicolului de țevi în pistă precum și stabilirea necesarului de frig pentru instalația frigorifică.

Capitolul 3 – Studiul procesului de solidificare unidirecțională cu ajutorul schemelor cu diferențe finite – prezintă detaliat metoda diferențelor finite pentru două elemente geometrice diferite și anume placă plană și perete cilindric.

Capitolul 4 – Studiul procesului de solidificare în pista patinoarului artificial cu ajutorul metodei elementului finit – prezintă domeniile analizate pentru două tipuri constructive ale pistei și anume pistă cu țevă scufundată în apă și pistă cu țevă îngropată în nisip. Este prezentat modelul matematic bazat pe metoda elementului finit precum și discretizarea domeniilor analizate.

Capitolul 5 – Cercetări experimentale ale câmpului de temperatură în jurul țevilor pistei patinoarului artificial – este prezentat standul experimental construit de autor care conține instalația frigorifică, pista patinoarului, circuitul de agent intermediar și sistemul de monitorizare și înregistrare a datelor.

Capitolul 6 – Rezultate comparative între cercetările experimentale și modelarea numerică cu element finit – prezintă rezultate comparative între cercetările experimentale și modelarea numerică cu element finit. Erorile relative nesemnificative obținute între modelarea numerică și cercetările experimentale validează modelul matematic propus de autor.

În ultima secțiune a tezei este prezentată bibliografia și anexa ce cuprinde date obținute teoretic și experimental precum și programul de calcul realizat pe baza modelului matematic dezvoltat în teză.

2. Elemente constructive și relații de calcul pentru pista patinoarului

2.1 Elemente constructive ale pistei patinoarului

Pista patinoarului trebuie să fie construită pe un teren sigur împotriva înghețului deoarece prin funcționarea instalației frigorifice, izoterma de 0°C coboară în sol la patinoarul de iarnă, până la adâncimea de 2 m și la patinoarul de vară la 4 m. Dacă la aceste adâncimi există pânză freatică, poate să aibă loc înghețarea apei și să se producă deteriorarea pistei.

În Figura 2.1 se prezintă o secțiune prin pista patinoarului. Plăcile de beton răcite au o grosime de 10...14 cm, stratul de beton de deasupra conductelor fiind de aproximativ 2,5 cm. Din cauza variațiilor mari de temperatură, placa trebuie să preia dilatări liniare importante fără să apară fisuri, deoarece acestea nu se pot repara. Pentru a se evita apariția fisurilor în placă se recomandă utilizarea de beton precomprimat sau turnarea plăcii continuu, fără întreruperi, utilizând beton de calitate și armarea deasupra și sub conducte.

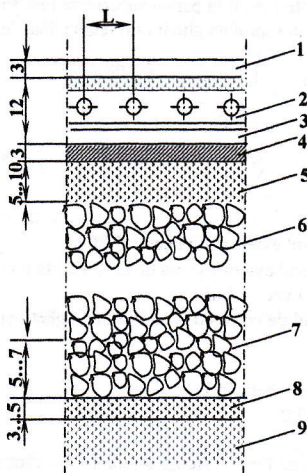


Fig. 2.1 Secțiunea prin pista unui patinoar artificial:

- 1 – strat de gheață 2,5 – 5 cm;
- 2 – placă de beton cu conducte de răcire și armătură;
- 3 – placă din beton cu talc;
- 4 – strat de alunecare din nisip;
- 5 – beton de egalizare;
- 6 – pietriș de marime 30 – 80 mm;
- 7 – zonă de rupere a vaselor capilare, formată din pietriș de marime 60 – 100 mm;
- 8 – zonă de filtrare;
- 9 – pământ.

1.2 Distribuția optimă a fascicolului de țevi

Câmpul de gheață al patinoarului se formează pe o placă de beton în care sunt înglobate țevile vaporizatorului. Temperatura la suprafața gheții nu este aceeași peste tot. Imediat deasupra țevilor, temperatura este cea mai scăzută, iar pe linia aflată la jumătatea spațiului dintre două țevi paralele, temperatura este cea mai ridicată.

În Figura 2.2 se prezintă o secțiune perpendiculară pe țevile de răcire și poziționarea acestora. Stratul considerat omogen de deasupra marginilor de sus ale țevilor este format practic dintr-un singur bloc, deoarece gheața și betonul au conductivitățile termice apropiate.

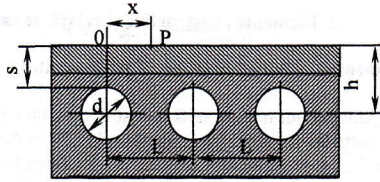


Fig 2.2. Secțiune perpendiculară pe țevi, necesară calculării temperaturii

Calculule se fac într-un stadiu avansat al funcționării când izoterma de 0°C s-a deplasat mult în sol. În această situație aportul de căldură de la sol este neglijabil; el este mare numai la începutul funcționării instalației, dar acesta scade rapid. Acest aport trebuie să fie scăzut pentru a se evita înghețarea solului, cu efecte nedorite.

Deci practic aportul de căldură este numai la partea superioară (aer sală). În aceste condiții se poate calcula temperatura unui punct P de la suprafața gheții prin relația dată de Rydberg și Huber [83]:

$$\frac{\theta L}{\pi A} = \frac{2}{x} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4L}{LX + 2\pi n} \cdot e^{-\frac{2\pi nh}{L}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi nx}{L}\right) \quad (2.1)$$

Valoarea auxiliară A se calculează din relația:

$$\frac{\theta_0}{A} = \ln \frac{L}{2\pi r} + \frac{2\pi}{L} \cdot \frac{1+x \cdot h}{x} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \frac{2\pi n - xL}{2\pi n + xL} e^{-\frac{4\pi h}{L} \cdot n} \quad (2.2)$$

unde:

θ - diferența de temperatură între aerul exterior și punctul P [$^{\circ}\text{C}$]

θ_0 - diferența de temperatură între aerul exterior și cea de la suprafața țevii de răcire [$^{\circ}\text{C}$]

L - distanțele dintre axele a două țevi vecine [m]

$X = \alpha/\lambda$ - raportul dintre coeficientul de convecție aer-suprafața gheții și conductivitatea termică pentru beton și gheață [m^{-1}]

r - raza exterioră a țevilor [m]

h - distanța de la axa țevii la suprafața gheții [m]

x - distanța de la punctul P la punctul 0

n - număr natural.

Tot după Rydberg și Huber[83] se poate calcula diferența Θ_m dintre temperatura aerului și temperatura medie la suprafața gheții, cu relația:

$$\theta_m \cdot \frac{L}{\pi A} = \frac{2}{x} \quad (2.3)$$

$$\text{Se notează: } \theta'_m = \theta_0 - \theta_m = t_e - t_t - (t_e - t_{ms}) = t_{ms} - t_t \quad (2.4)$$

unde: t_e - temperatura aerului exterior;

t_t - temperatura la suprafața țevii;

t_{ms} - temperatura medie la suprafața gheții.

Se exprimă raportul:

$$y = \frac{\theta'_m}{\theta_0} = \frac{\theta_0 - \theta_m}{\theta_0} = 1 - \frac{\theta_m}{\theta_0} = \frac{t_{ms} - t_t}{t_e - t_t} \quad (2.5)$$

care este funcție de α, λ, r, h și L .

Din relațiile (2.2), (2.3) și (2.4) se obține:

$$y = 1 - \frac{\frac{2\pi}{Lx}}{\ln \frac{L}{2\pi r} + \frac{2\pi}{L} \cdot \frac{1+xh}{x} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot \frac{2\pi n - xL}{2\pi n + xL} e^{-\frac{4\pi nh}{L}}} \quad (2.6)$$

1.3 Stabilirea necesarului de frig

Determinarea necesarului de frig pentru funcționarea normală a patinoarului se stabilește în funcție de anumite condiții inițiale, condiții generale sau specifice fiecărui patinoar. Temperatura gheții trebuie să fie cuprinsă între $-2,2 \dots -3,3$ °C, o temperatură mai ridicată ar duce la topirea rapidă a gheții, la pătrunderea adâncă a lamei patinei în grosimea gheții. O temperatură coborâtă sub -4 °C ar face gheața foarte casantă. Grosimea gheții este și ea o mărime aproape constantă, valorile indicate fiind de 30...50 mm.

Frigul necesar pentru producerea gheții

Cantitatea de căldură preluată de agentul frigorific pentru formarea stratului de gheață se calculează cu relația:

$$Q_1 = \rho_g \cdot V(c_w \cdot \Delta t_w + l_s + c_g \cdot \Delta t_g) \quad [J] \quad (2.7)$$

unde:

ρ_g – densitatea gheții; V – volumul de gheață de pe suprafața patinoarului; c_w, c_g – căldurile specifice pentru apă și gheață; l_s – căldura latentă de solidificare a apei; $\Delta t_w, \Delta t_g$ – variația temperaturii apei și gheții

Puterea frigorifică medie necesară formării gheții este:

$$\Phi_1 = \frac{Q_1}{\tau} \quad [W] \quad (2.8)$$

unde τ este timpul de formare a gheții și care poate fi calculat cu relația:

$$\tau = \frac{\rho \cdot l_t}{\alpha_e (t_e - t_g)} \cdot \delta_g - \frac{\rho \cdot l_t (t_g - t_0) \cdot \lambda_g}{\alpha_e^2 (t_e - t_g)^2} \cdot \ln \left(1 - \frac{\delta_g}{\delta_{g \max}} \right) \quad [s] \quad (2.9)$$

Se consideră schimbul de căldură dintre aer și suprafața gheții, presupunând o temperatură medie în planul orizontal în care sunt montate țevile de răcire.

Se va avea în vedere că fluxul termic unitar este mai mare la început când rezistența termică a stratului de gheață este mai mică.

Fluxul de căldură preluat din sol

Datorită diferenței de temperatură între sol și agentul frigorific, va lua naștere un flux de căldură de la sol la țevile prin care circulă agentul frigorific. Acest flux este mai redus în comparație cu fluxul de căldură prin convecție și radiație. Se recomandă următoarele valori:

$$q = 10,5 \text{ W/m}^2 \quad \text{la } t_0 = -5^\circ\text{C}$$

$$q = 13 \text{ W/m}^2 \quad \text{la } t_0 = -10^\circ\text{C}$$

unde t_0 reprezintă temperatura agentului de răcire în conducte.

Flux de căldură cedat de aerul exterior prin convecție și prin condensarea vaporilor de apă din aer pe suprafața gheții.

Pentru calculul fluxului de căldură prin convecție se recomandă relația lui Jurges și Merkel [84]:

$$Nu = 0.057 Re^{0.78} Pr^{0.78} \quad (2.10); \quad Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (2.11); \quad Re = \frac{w \cdot L}{\nu} > 5 \cdot 10^5 \quad (2.12)$$

unde: $Pr = 0,71$; L este lungimea pistei.

Coefficienții de convecție α , au valori în jur de $8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Prin condensarea și brumarea umidității pe suprafața gheții, coeficientul de schimb superficial crește. Acest coeficient ce ține seama de fenomenul de condensare a vaporilor de apă este denumit coeficient aparent și după Merkel se poate calcula cu relația:

$$\alpha' = \alpha \cdot \frac{(i - i_w) - (x - x_w) \cdot i_w}{t_a - t_w} \quad (2.13)$$

unde: α - coeficientul convectiv al aerului uscat; i - entalpia aerului; i_w - entalpia aerului saturat la suprafața apei; x_w - umiditatea absolută a aerului saturat la suprafața apei; x - umiditatea absolută a aerului; i_w - entalpia apei ce condensează; t_a, t_w - temperaturile apei (gheții) și aerului

Aportul de căldură prin radiație de la atmosferă

Intensitatea radiației solare este variabilă cu anotimpul, ora, latitudinea geografică etc. O parte din radiația solară ce atinge suprafața pistei este absorbită și o altă parte este reflectată. Fluxul de căldură unitar absorbit de suprafața pistei se prezintă în nomograma întocmită de Kubli (Figura 2.3). S-a considerat un coeficient de absorbție de 0,5 și radiația maximă de la ora 12.

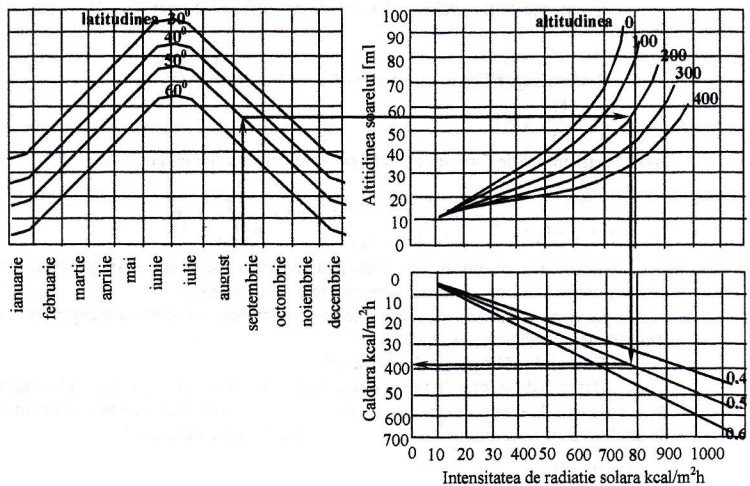


Figura 2.3

Aportul de căldură spre pistă de la ploaie

Intră în calculul necesarului de frig pentru patinoarele descoperite. Se poate admite de la ploaie, un flux de căldură de aproximativ 210W/m^2 .

3. Metode cu diferențe finite pentru analiza teoretică a solidificării în exteriorul unui perete plan

În prezentul subcapitol se tratează problema solidificării unidirecționale pe suprafața unui perete plan.

În Fig.3.1 este prezentat schematic domeniul spațial analizat, precum și câmpul de temperatură în cele trei zone (regiuni): perete, solid, lichid. Prin W s-a notat grosimea peretelui (indice "W"), prin S s-a notat grosimea domeniului solid, variabilă în timp: $S=S(\tau)$, (indice "S") și prin L grosimea domeniului lichid, deasemeni variabilă: $L=L(\tau)$, (indice "L"). Grosimea domeniului corespunzător substanței cu schimbare de fază s-a notat cu H .

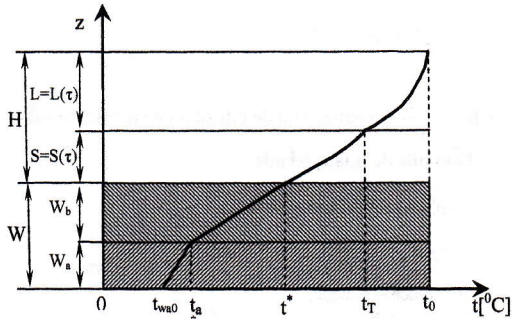


Fig.3.1. Schema sistemului analizat la solidificarea unidirecțională, în cazul plăcii plane

Se presupune că până la momentul inițial $\tau = 0$, temperatura sistemului perete - SSF este uniformă și egală cu $t_0 > t_T$. Se presupune în continuare că la acest moment, fața stângă a peretelui este instantaneu răcită la temperatura $t_R < t_T$, declanșându-se procesul de extragere a căldurii din substanța cu schimbare de fază.

În Figura 3.1 este reprezentată starea sistemului la un moment intermediar oarecare (τ), atunci când grosimea stratului solid este $S(\tau)$, cea a stratului lichid, $L(\tau)$ ($S + L = H$), iar temperaturile fețelor peretelui sunt:

t_{wa0} - temperatura feței răcite inferioare;

t - temperatura feței superioare a peretelui, egală cu temperatura stratului solid la contactul cu peretele (se presupune un contact termic perfect între perete și solid);

t_T - temperatura de schimbare de fază;

t_0 - temperatura la suprafața domeniului lichid

t_a^* - temperatura interfetelor dintre cele două straturi solide

Procesul se consideră încheiat, atunci când grosimea stratului solid devine egală cu H , adică $L = 0$.

Ecuțiile care descriu fenomenul sunt următoarele:
Ecuția conducției (scrisă pentru cele trei domenii)

- placă metalică-placă beton:

$$\frac{\partial t_{wa}}{\partial \tau} = a_{wa} \cdot \frac{\partial^2 t_{wa}}{\partial z^2} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial t_{wb}}{\partial \tau} = a_{wb} \cdot \frac{\partial^2 t_{wb}}{\partial z^2} \quad (3.2)$$

- placă - gheață:

$$\frac{\partial t_s}{\partial \tau} = a_s \cdot \frac{\partial^2 t_s}{\partial z^2} \quad (3.3)$$

- lichid:

$$\frac{\partial t_L}{\partial \tau} = a_L \cdot \frac{\partial^2 t_L}{\partial z^2} \quad (3.4)$$

unde $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ – coeficientul de difuzibilitate termică al substanței domeniului respectiv:

Ecuțiile de bilanț termic

- placă metalică-placă beton:

$$-\lambda_{wa} \cdot \left(\frac{\partial t_{wa}}{\partial z} \right)_{z=wa} = -\lambda_{wb} \cdot \left(\frac{\partial t_{wb}}{\partial z} \right)_{z=wb} \quad (3.5)$$

- placă - gheață :

$$-\lambda_{wb} \cdot \left(\frac{\partial t_{wb}}{\partial z} \right)_{z=w} = -\lambda_s \cdot \left(\frac{\partial t_s}{\partial z} \right)_{z=w} \quad (3.6)$$

- placă - lichid:

$$-\lambda_{wb} \cdot \left(\frac{\partial t_{wb}}{\partial z} \right)_{z=w} = -\lambda_L \cdot \left(\frac{\partial t_L}{\partial z} \right)_{z=w} \quad (3.7)$$

- gheață - lichid:

$$\lambda_s \cdot \left(\frac{\partial t_s}{\partial z} \right)_{z=w+s} = \lambda_L \cdot \left(\frac{\partial t_L}{\partial z} \right)_{z=w+s} + \rho \cdot l \cdot \frac{ds}{d\tau} \quad (3.8)$$

3.1 Rezultate numerice în cazul plan

În acest subcapitol sunt prezentate rezultatele obținute în urma rulării programelor de calcul scrise în baza relațiilor și algoritmilor care au făcut obiectul celor două subcapitole precedente. Programele au fost rulate cu ajutorul programului Matlab.

În calcule au fost luate în considerare următoarele elemente:

- geometria sistemului : plan

- materialul din care este făcut peretele: oțel și beton
- substanța cu schimbare de fază: apa
- în cazul peretelui plan raportul W/H dintre grosimea W a peretelui metalic și grosimea H a substanței cu schimbare de fază: $W/H = 0.004/0.01$ m
- numărul de noduri - în peretele metalic $N_W = 4$; în solid $N_S = 6$; în lichid $N_L = 6$
- temperatura inițială a apei $t_0 = 5$ °C
- temperatura de schimbare de fază $t_T = 0$ °C
- condiții la limită de speța I - temperatura de răcire $t_R = -10$ °C
- condiții la limită de speța II - densitatea de flux termic $q_0 = 1000$ W/m²
- condiții la limită de speța III - agent $\alpha_R = 200$ W/m²K; aer $\alpha_a = 15$ W/m²K
- temperatura adimensională de schimbare de fază $\theta_T = 0.6667$
- pasul de timp $\Delta\tau = 0.5$ s pentru peretele plan

În Figura 3.2 este reprezentat câmpul de temperatură în cazul plan, la diverse momente de timp. Condițiile la limită sunt de speța I cu $t_R = -10$ °C. Se observă că temperatura scade foarte repede în perete, astfel că după $\tau = 838$ s diferența de temperatură între cele două fețe ale peretelui este nesemnificativă.

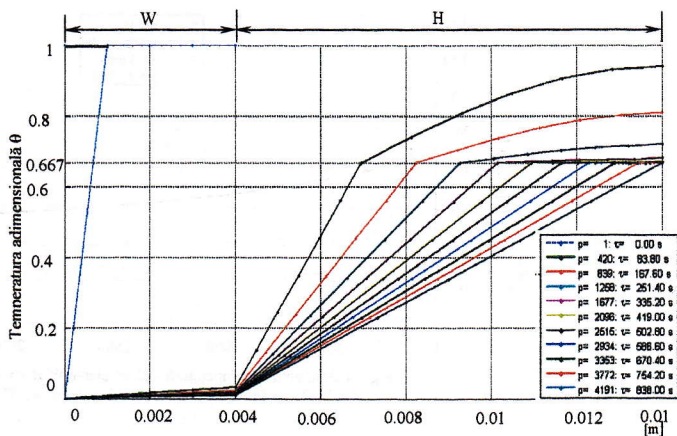


Fig.3.2 Temperatura adimensională – placă plană: $W/H = 0.004/0.01$;
 $N_W/N_S/N_L = 4/6/6$; $CC_S: S_1$; $\Delta\tau = 0.2$ s; durata 13.97 min

6

În Figura 3.3 este prezentată variația grosimii gheții și a vitezei frontului de solidificare în timp, pentru cazul plan și condiții la limită de speța a III a . Se observă că grosimea crește liniar ajungând la valoarea de 10 mm după aproximativ 41.57 de minute. Viteza frontului de solidificare este mare la începutul procesului și scade odată cu creșterea grosimii gheții, astfel la $\tau = 2500$ s valoarea vitezei este de aproximativ 3×10^{-6} m/s. În Figura 3.4 este prezentată variația gradientilor de temperatură în timp, în perete, în lichid și pe granițele perete-solid respectiv solid-lichid. Se observă că gradientul de temperatură în perete are o variație nesemnificativă în timp în comparație cu gradientul de temperatură din lichid care crește foarte mult la începutul procesului după care scade și devine nul odată cu transformarea completă a lichidului în solid. Gradientii de temperatură pe granițele solid-perete și solid-lichid sunt aproximativ egali și mult mai mari decât gardienții din perete și lichid.

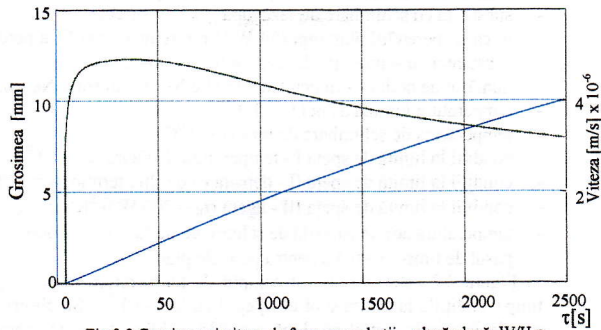


Fig.3.3 Grosimea și viteza de formare a gheții – placă plană: $W/H = 0.004/0.01$; $N_w/N_g/N_L = 4/6/6$; $CC_S: S_3$; $\Delta\tau = 0.2$ s; durata 41.57 min

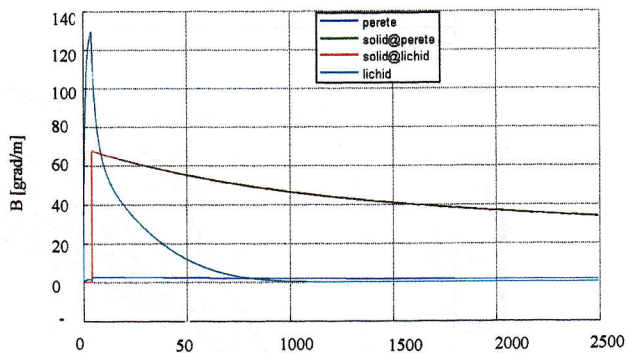


Fig.3.4 Gradienții de temperatură – placă plană: $W/H = 0.004/0.01$; $N_w/N_g/N_L = 4/6/6$; $CC_S: S_3$; $\Delta\tau = 0.2$ s; durata 41.57 min

4. Aplicarea metodelor cu diferențe finite bazate pe rețele cu prag variabil în analiza teoretică a solidificării în exteriorul unui perete cilindric

În cadrul prezentului subcapitol se va trata problema solidificării apei în exteriorul unui perete cilindric metalic, folosindu-se metoda rețelei cu pas variabil.

Sistemul analizat este compus din următoarele elemente, prezentate în Fig. 4.1:

- peretele cilindric de rază interioară R_0 și exterioră R_w , grosimea acestuia fiind egală cu W ($W = R_w - R_0$);
- substanța cu schimbare de fază din exteriorul peretelui, având razele interioară R_w și exterioră R (grosimea $H = R - R_w$). La momentul τ , raza exterioră a stratului solid este $R_s(\tau)$, grosimea acestuia fiind $S(\tau) = R_s(\tau) - R_w$. Grosimea stratului lichid este $L(\tau) = H - S(\tau)$.

Semnificația temperaturilor este aceeași ca și în cazul peretelui plan, iar fazele procesului sunt aceleași.

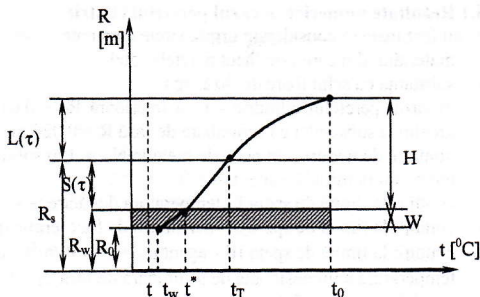


Fig 4.1. Elementele geometrice ale sistemului perete cilindric - SSF

Ecuatiile care descriu fenomenele, scrise direct în temperaturi adimensionale sunt:

Ecuatia conductiei:

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial \tau} = a_i \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta_i}{\partial r} \right) \quad (4.1)$$

în care indicele "i" semnifică după caz W - perete, S - solid sau L - lichid

Ecuatiile de conservare la contactul dintre domenii:

$$\lambda_W \cdot \left(\frac{\partial \theta_W}{\partial r} \right)_{r=R_W} = \lambda_j \cdot \left(\frac{\partial \theta_j}{\partial r} \right)_{r=R_W} \quad (4.2)$$

unde "j" semnifică, funcție de fază, L - lichid (faza II) sau S - solid (faza III).

$$\dot{R}_S(\tau) = \frac{dR_S}{d\tau} = \frac{t_0 - t_R}{\rho \cdot l} \cdot \left[\lambda_S \cdot \left(\frac{\partial \theta_S}{\partial r} \right)_{r=R_S(\tau)} - \lambda_L \cdot \left(\frac{\partial \theta_L}{\partial r} \right)_{r=R_S(\tau)} \right] \quad (4.3)$$

Condiția inițială:

$$\tau = 0 : \theta = \theta_0 = 1, \quad \forall r \in [R_W, R] \quad (4.4)$$

Condiții de contur:

a. pe suprafața interioară a peretelui:

$$\text{speța I: } \theta_{W,0} = 0 \quad \text{speța II: } \lambda_W \cdot \left(\frac{\partial \theta_W}{\partial r} \right)_{R=R_0} = q_0 \quad \text{speța III: } \lambda_W \cdot \left(\frac{\partial \theta_W}{\partial r} \right)_{r=R_0} = k \cdot \theta_{W,0} \quad (4.5)$$

$$\text{la capătul domeniului lichid: } \left(\frac{\partial \theta_L}{\partial r} \right)_{r=R} = 0$$

4.1 Rezultate numerice în cazul peretelui cilindric

În calcule au fost luate în considerare următoarele elemente:

- materialul din care este făcut peretele: oțel
- substanța cu schimbare de fază: apa
- în cazul peretelui cilindric - raza interioară $R_0 = 0.01$ m, raza exterioră $R_W = 0.014$ m, grosimea substanței cu schimbare de fază $R = 0.024$ m
- numărul de noduri - în peretele metalic $N_W = 4$; în solid $N_S = 6$; în lichid $N_L = 6$
- temperatura inițială a apei $t_0 = 5$ °C
- condiții la limită de speța I - temperatura de răcire $t_R = -10$ °C
- condiții la limită de speța II - densitatea de flux termic $q_0 = 1000$ W/m²
- condiții la limită de speța III - agent $\alpha_R = 200$ W/m²K; aer $\alpha_a = 15$ W/m²K
- temperatura adimensională de schimbare de fază $\theta_T = 0.6667$
- pasul de timp $\Delta\tau = 0.3$ s

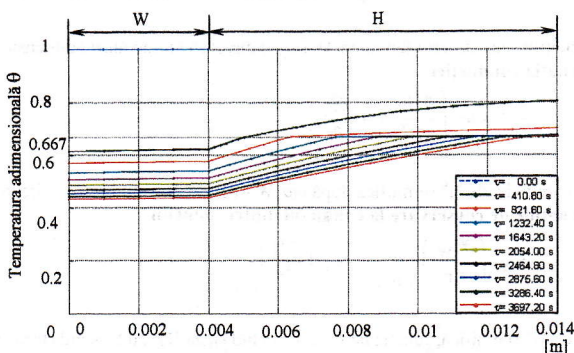


Fig.4.2 Temperatura adimensională – cilindru: $W/H = 0.004/0.01$;
 $N_W/N_S/N_L = 4/6/6$; CC_S : S_3 ; $\Delta\tau = 0.2$ s; durata 68.45 min

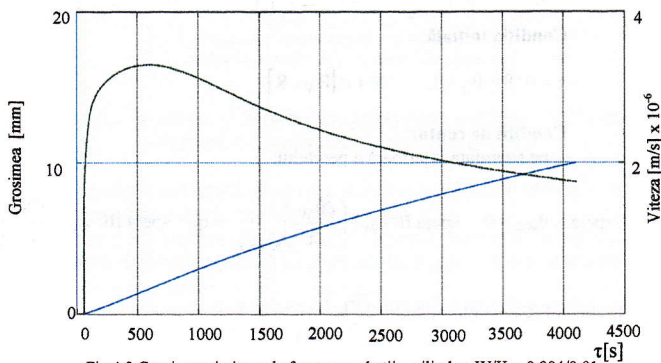


Fig.4.3 Grosimea și viteza de formare a gheții – cilindru: $W/H = 0.004/0.01$;
 $N_W/N_S/N_L = 4/6/6$; CC_S : S_3 ; $\Delta\tau = 0.2$ s; durata 68.45 min

5. Modelarea numerică a transferului de căldură cu schimbare de fază în regim nestaționar prin metoda volumului finit

Modelarea numerică a fost realizată cu ajutorul softului Fluent 6.3, pentru două cazuri constructive ale pistei patinoarului si anume:

- pistă cu țevi scufundate în apă
- pistă cu țevi îngropate în nisip.

În ambele cazuri modelarea numerică a presupus parcurgerea mai multor etape:

- etapa de preprocesare – presupune realizarea geometriei domeniilor analizate și a discretizării acestora;
- etapa de procesare – constă în alegerea modelelor specifice și a solver-ului destinat procesului de transfer de căldură cu schimbare de fază, stabilirea condițiilor la limită și inițiale, alegerea materialelor și a proprietăților acestora, precum și monitorizarea soluției .
- etapa de postprocesare – presupune afișarea, prelucrarea, compararea și validarea rezultatelor obținute ca rezultat al modelării numerice cu date obținute prin măsurători pe modelul fizic real.

5.1 Realizarea geometriei și a discretizării domeniilor analizate

Calitatea geometriei și a grilei de discretizare pentru domeniile analizate, joacă un rol deosebit de important în stabilitatea și acuratețea calculului numeric. Geometria 2D pentru cazurile analizate s-a realizat în Gambit 3.2, un preprocesor integrat pentru analiza CFD.

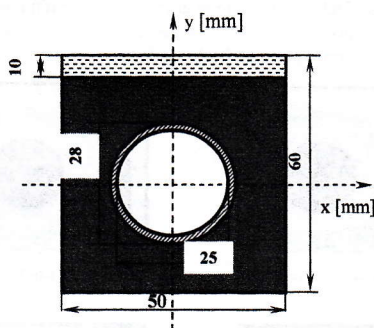


Fig.5.1 Domeniul cu țevă îngropată în nisip

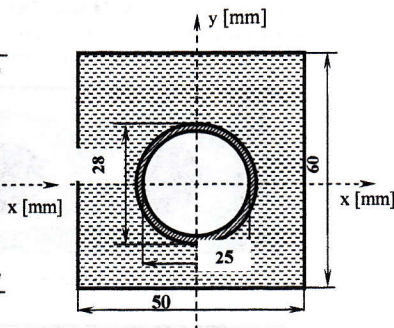


Fig.5.2 Domeniul cu țevă scufundată în apă

Grila în cazul geometriei cu țevă scufundată în apă conține 13563 de noduri și 12952 elemente patrulatere, iar în cel de al doilea caz cu țevă îngropată în nisip 11243 de noduri și 10896 de elemente. Datorită grilării structurate multibloc cu elemente patrulatere, grila conține un număr relativ mic de elemente, fapt ce va influența pozitiv timpul de calcul, convergența soluției și acuratețea rezultatelor.

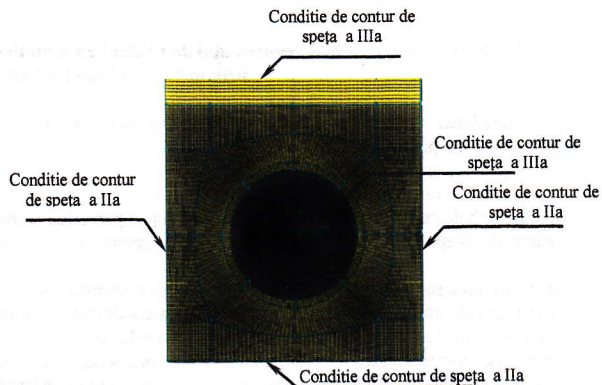


Fig.5.3 Condițiile la limită pe granițele domeniului

5.2 Rezultate numerice în cazul țevii scufundate în apă

În cazul simulării numerice a formării gheții în jurul țevii scufundate în apă, au fost realizate 25210 iterații la un pas de timp $\tau = 10$ secunde. Timpul total de desfășurare a procesului a fost de 7 ore, procesul considerându-se încheiat la o temperatură pe suprafața liberă a gheții de $-5,55^{\circ}\text{C}$. Continuarea procesului de subrăcire a gheții sub această valoare a temperaturii nu aduce modificări importante la nivelul câmpului termic pe suprafețele studiate.

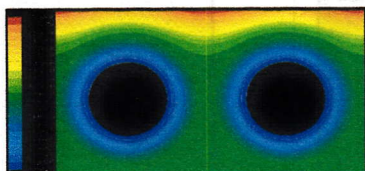


Fig.5.4 Distribuția temperaturii la $\tau = 90\text{min}$



Fig.5.5 Distribuția temperaturii la $\tau = 150\text{min}$



Fig.5.6 Distribuția temperaturii la $\tau = 240\text{min}$

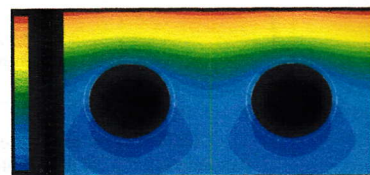


Fig.5.7 Distribuția temperaturii la $\tau = 420\text{min}$

În Figura 5.8 se observă o scădere accentuată a temperaturii în nodurile situate deasupra țevii și o scădere mai lentă în punctele situate la mijlocul distanței dintre țevi. Sub izoterma de 0°C , după $\tau = 300\text{min}$, se observă o distribuție aproape constantă în noduri.

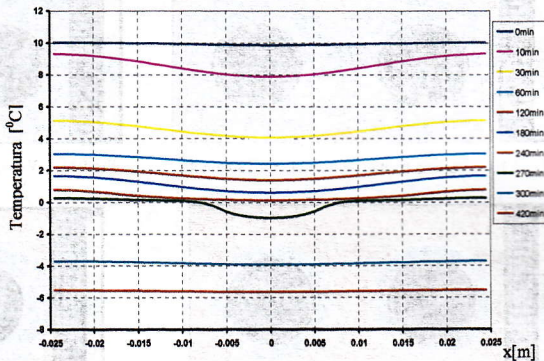


Fig. 5.8 Variația temperaturii pe suprafața apei la diferite intervale de timp

În Figura 5.9 temperatura are o variație diferită în nodurile din placa de sub țevă, astfel aceasta scade mult în punctele poziționate în dreptul țevii și crește spre jumătatea distanței dintre țevi. Se poate observa din grafic că temperatura de 0°C ajunge pe suprafața plăcii după aproximativ 134 de minute și rămâne aproximativ constantă la $-8,2^{\circ}\text{C}$ după 420 de minute de la începutul procesului.

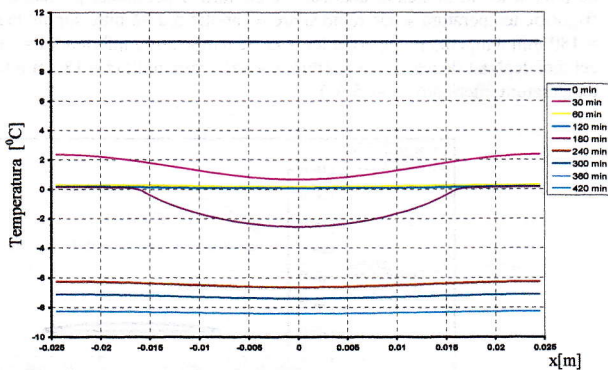


Fig. 5.9 Variația temperaturii pe suprafața plăcii de sub țevă la diferite intervale de timp

O importanță deosebită în derularea procesului de formare a gheții pe suprafața exterioară a țevii o constituie variația în timp a ratei de solidificare.

În Figurile 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 sunt prezentate imagini din timpul deplasării frontului de solidificare la anumite intervale de timp.



266.576

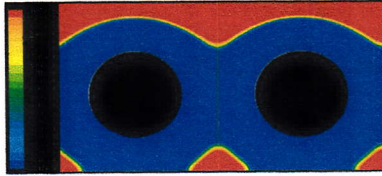


Fig.5.10 Variația fracției de lichid la $\tau = 180$ minute

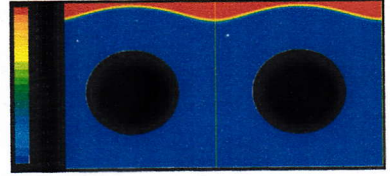


Fig.5.11 Variația fracției de lichid la $\tau = 240$ minute

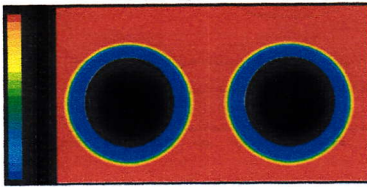


Fig. 5.12 Variația fracției de lichid la $\tau = 60$ minute

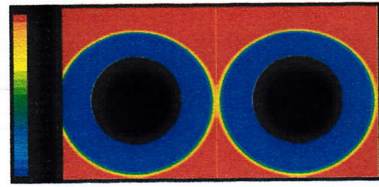


Fig.5.13 Variația fracției de lichid la $\tau = 120$ minute

În Figurile 5.14, 5.15, 5.16 este prezentată variația temperaturii pe cele trei contururi la diverse intervale de timp. Se poate observa distribuția diferită a temperaturii pe suprafața conturilor funcție de poziția lor în domeniul analizat. Pe conturul I poziționat pe suprafața exterioră a țevii cu agent frigorific temperatura scade rapid și are o variație redusă între suprafața superioară și cea inferioară ($\tau = 180$ min temperatura superioară $t = -3$ °C temperatura inferioară $t = -3,8$), în schimb pe conturul III, cel mai depărtat de țevă, temperatura variază foarte mult ($\tau = 180$ min temperatura superioară $t = 0$ °C temperatura inferioară $t = -2,5$ °C).

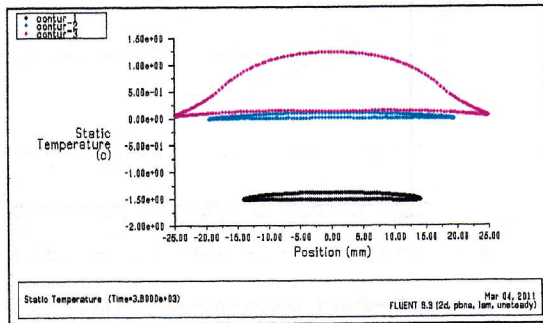


Fig. 5.14 Variația temperaturii pe cele trei contururi la $\tau = 60$ min

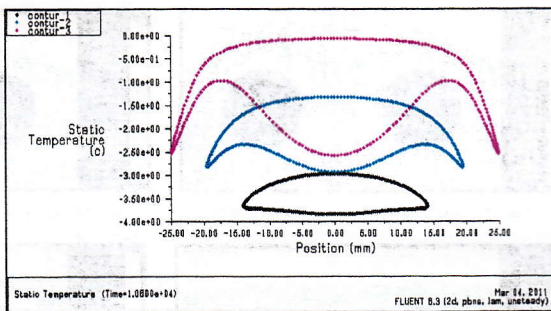


Fig. 5.15 Variația temperaturii pe cele trei contururi la $\tau = 180\text{min}$

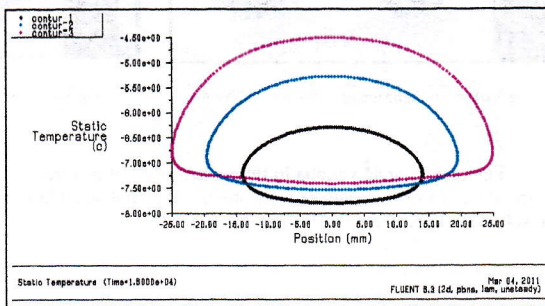


Fig. 5.16 Variația temperaturii pe cele trei contururi la $\tau = 300\text{min}$

5.3 Rezultate numerice în cazul țevii îngropate în nisip

În cazul țevii îngropate în nisip s-au efectuat 18000 de iterații la un pas de timp de 10 s. Timpul de desfășurare a procesului de solidificare a fost de 5 ore, procesul considerându-se încheiat la o temperatură pe suprafața liberă a gheții de $-4,62\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La fel ca în cazul țevii scufundate în apă, au fost introduse puncte și contururi pentru monitorizarea temperaturii, cu aceleași coordonate și dimensiuni. Față de cazul precedent apare în plus o suprafață și anume suprafața de contact apă - nisip, care deasemenea a fost studiată din punct de vedere termic.

În Figurile 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 este prezentată distribuția temperaturii pe domeniul de calcul la anumite intervale de timp.

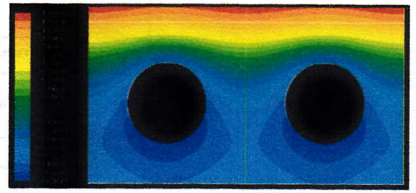
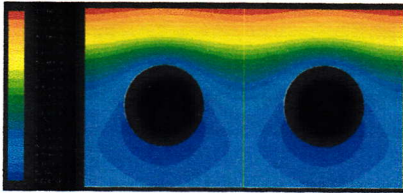
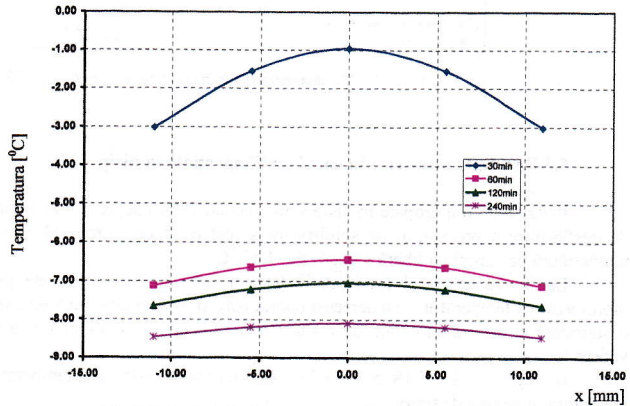


Figura 5.21 arată variația în timp a temperaturii pe direcția axei X între două țevi consecutive. Temperatura cea mai ridicată se înregistrează în planul situat la jumătatea distanței dintre țevi, iar cea mai scăzută în punctele din vecinătatea țevii.



În Figurile 5.22, 5.23, 5.24, 5.25 sunt prezentate imagini cu evoluția frontului de solidificare în masa de lichid la diferite momente de timp.

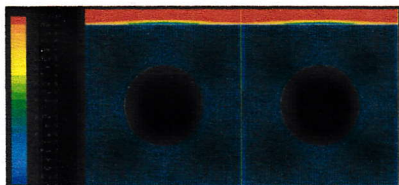


Fig.5.22 Evoluția frontului de solidificare la $\tau = 30\text{min}$

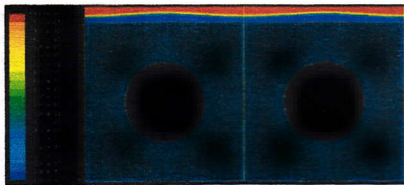


Fig.5.23 Evoluția frontului de solidificare la $\tau = 90\text{min}$

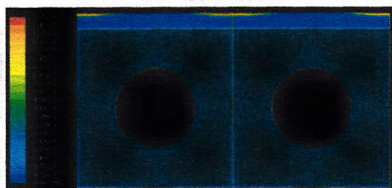


Fig.5.24 Evoluția frontului de solidificare la $\tau = 120\text{min}$

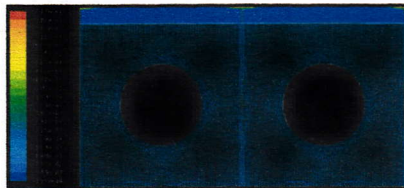


Fig.5.25 Evoluția frontului de solidificare la $\tau = 160\text{min}$

Din graficele prezentate în Figurile 5.26, 5.27, 5.28 se poate observa că temperatura variază diferit pe cele trei contururi până la sfârșitul procesului. Astfel la $\tau = 240\text{min}$ temperatura minimă pe conturul I este de $t = -8,8^\circ\text{C}$, pe conturul II $t = -8,53^\circ\text{C}$, iar pe conturul III $t = -8,45^\circ\text{C}$.

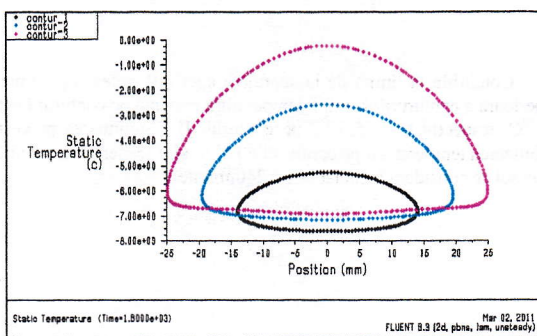


Fig. 5.26 Variația temperaturii pe cele trei contururi la $\tau = 30\text{min}$

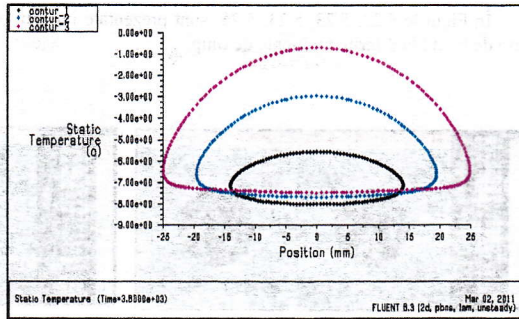


Fig. 5.27 Variația temperaturii pe cele trei contururi la $\tau = 60\text{min}$

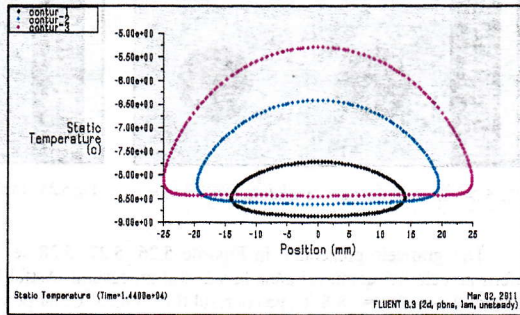


Fig.5.28 Variația temperaturii pe cele trei contururi la $\tau = 240\text{min}$

Condițiile la limită de la suprafața apei influențează puternic distribuția temperaturii pe partea superioară a conturilor, astfel temperatura maximă pe conturul I este $t = -7,75\text{ }^{\circ}\text{C}$, pe conturul II $t = -6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectiv $t = -5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pe conturul III. Continuarea procesului de subțrire a gheții duce la stabilizarea temperaturii pe conturile I și II, și o scădere foarte lentă pe conturul III, motiv pentru care procesul se consideră încheiat la $\tau = 240\text{minute}$.

6. Cercetări experimentale ale câmpului de temperatură în jurul țevilor pistei patinoarului artificial

Pentru studiul experimental al evoluției câmpului de temperatură în jurul conductelor pistei patinoarului, în cadrul Laboratorului de “Instalații frigorifice și pompe de căldură”, am realizat un stand pentru analizarea fenomenului în condiții reale de funcționare. Studiul experimental a fost eșalonat pe două faze, în cadrul cărora s-au conceput și realizat mai multe etape.

Principalele părți componente ale standului experimental realizat sunt:

- instalația frigorifică;
- pista patinoarului;
- circuitul de agent intermediar de răcire;
- sistemul de măsurare și înregistrare al temperaturii.

Cercetările experimentale au cuprins două faze:

Faza I - studiul câmpului de temperatură în jurul țevilor scufundate în apă

Faza II - studiul câmpului de temperatură în jurul țevilor îngropate în nisip;

În cadrul cercetărilor experimentale s-au avut în vedere aspecte privind determinarea temperaturilor pe diferite suprafețe de interes ale pistei patinoarului cât și aspecte privind calitatea și forma gheții în jurul țevilor.

6.1 Instalația frigorifică

Instalația frigorifică (Figura 6.1) este cu comprimare mecanică de vapori, funcționând într-o treaptă de comprimare, cu Freon R134a. Instalația realizează răcirea pistei prin intermediul unui agentului frigorific intermediar, etilen-glicol, care este răcit separat într-un bazin.

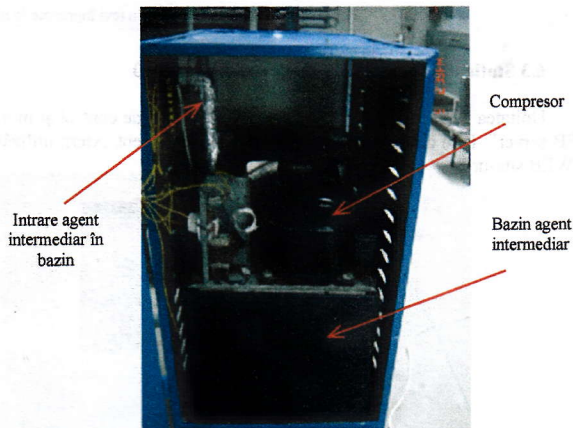


Fig.6.1 Instalația frigorifică

6.2 Pista patinoarului

Având în vedere tipurile constructive pentru pistele patinoarelor, pentru instalația experimentală am ales două tipuri de piste și anume cu țevi scufundate în apă respectiv cu țevi îngropate în nisip.



Fig.6.2 Pista patinoarului cu țevi scufundate în apă

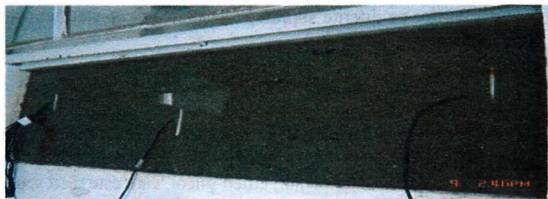


Fig.6.3 Pista patinoarului cu țevi îngropate în nisip

6.3 Stația de monitorizare și control XWEB 500

Unitatea XWEB 500 (Figura 6.4) este un sistem de control și monitorizare bazat pe tehnologia “WEB server”. Este capabilă să comunice date cu un client extern utilizând aceeași procedură folosită de “WEB site-uri”.



Fig.6.4 Stația de monitorizare XWEB 500

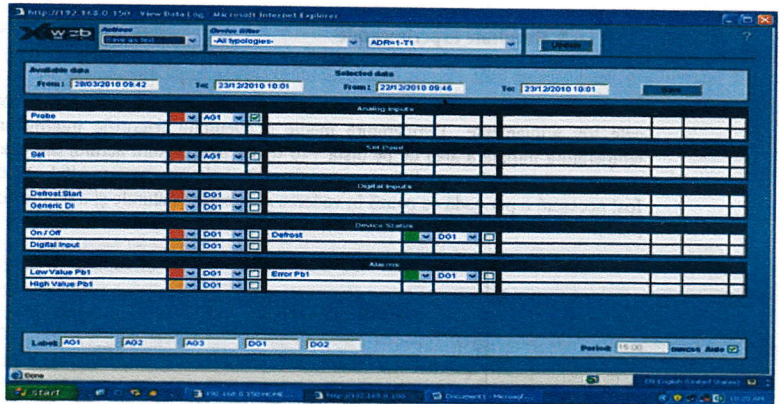


Fig.6.5 Interfața grafică a aplicației XWEB 500

6.4 Poziționarea termocuplelor

Rețeaua de termocuple este poziționată identic pentru cele două cazuri constructive ale pistei. S-a urmărit înregistrarea temperaturilor la intrarea în pistă (aliniamentul I), la jumătatea pistei (aliniamentul II) și la ieșirea din pistă (aliniamentul III). Datorită faptului că geometria pistei prezintă simetrie am considerat pentru măsurarea temperaturilor țeava din centru pistei.

În Figura 6.6 este prezentată poziționarea termocuplelor în jurul țevii considerate.

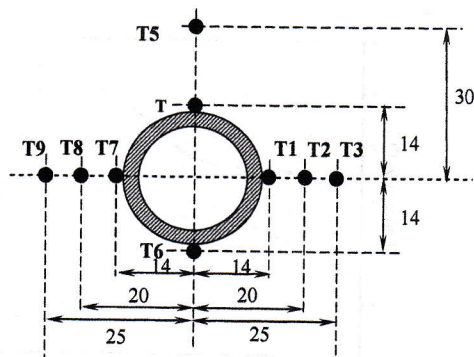


Fig.6.6 Poziționarea termocuplelor în jurul țevii

6.5 Rezultate experimentale

Faza I - țevă scufundată în apă

Faza I experimentală a constat în măsurarea temperaturilor din jurul țevii scufundate în apă, pe cele trei aliniamente. Temperatura medie a agentului frigorific intermediar a fost de -10°C , temperatura inițială a apei de pe pistă $+10^{\circ}\text{C}$, iar temperatura aerului din laborator $+12^{\circ}\text{C}$. Măsurarea temperaturilor pe fiecare aliniament s-a făcut în ședințe separate astfel că după fiecare experiment a fost necesară o perioadă de pauză în vederea dezghețării naturale și a omogenizării temperaturii apei pe pistă.

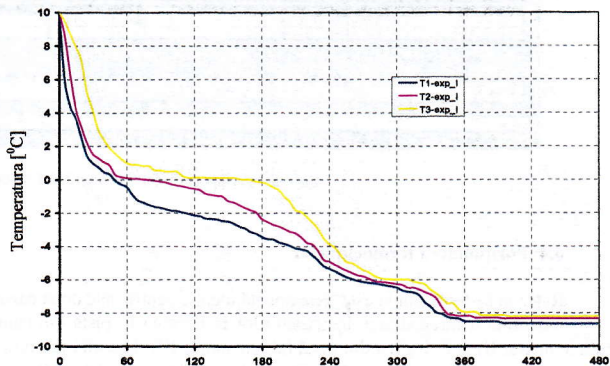


Fig. 6.7 Variația temperaturii în timp la termocuplele T1, T2, T3, poziționate pe aliniamentul I

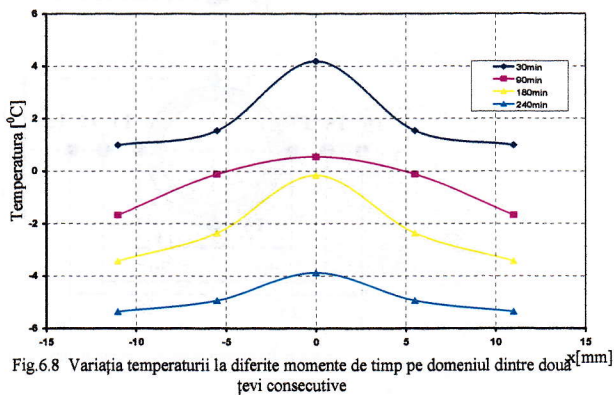


Fig. 6.8 Variația temperaturii la diferite momente de timp pe domeniul dintre două țevi consecutive

În Figura 6.7 este dată variația temperaturii în timp la termocuplele T1, T2, T3, poziționate după axa OX (Figura 6.6) pe aliniamentul I. Astfel se observă că variația temperaturii este diferită la perețele

țevii (T1) față de jumătatea intervalului dintre țevi (T3) (Figura 6.8). Acest lucru duce la formarea rapidă a gheții în imediata vecinătate a țevii și într-un timp mai lung pe domeniul dintre țevi. Astfel la termocupla T1, poziționată lângă țevă, se înregistrează temperatura de 0°C după aproximativ 50 de minute pe când la termocupla T3, poziționată la jumătatea intervalului dintre țevi, după aproximativ 160 de minute.

Faza II - țevă îngropată în nisip

Faza II experimentală a constat în măsurarea și înregistrarea temperaturilor la cele nouă termocuple poziționate pe aliniamentele I,II,III, în cazul pistei cu țevi îngropate în nisip. Condițiile de funcționare a instalației au fost identice cu cele din Faza I și anume: temperatura medie a agentului frigorific intermediar a fost de -10°C , temperatura inițială a apei de pe pistă $+10^{\circ}\text{C}$, iar temperatura aerului din laborator $+12^{\circ}\text{C}$.

În Figura 6.9 este dată variația temperaturii în timp înregistrată la termocuplele T1,T2,T3, poziționate pe aliniamentul I. Se observă că temperatura scade foarte mult în prima parte a procesului și se stabilizează după aproximativ 210 minute în jurul valorii de -8°C . Totodată se remarcă o scădere mai pronunțată a temperaturii la termocupla T1 poziționată lângă țevă, față de temperatura înregistrată la termocupla T3 poziționată la jumătatea distanței dintre două țevi consecutive.

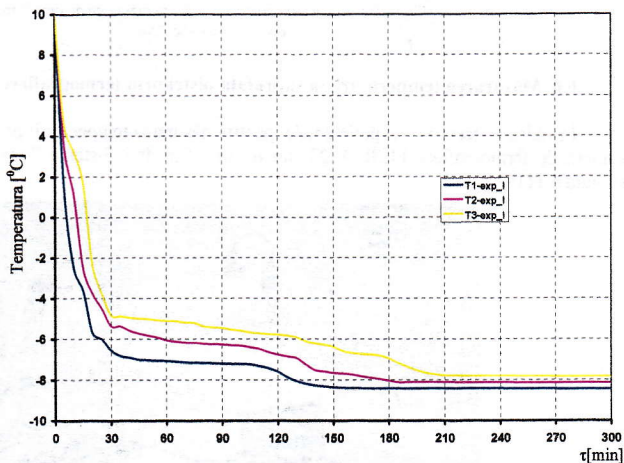


Fig.6.9 Variația temperaturii în timp la termocuplele T1,T2,T3, poziționate pe aliniamentul I

În Figura 6.10 este dată variația temperaturii între două țevi consecutive. Se observă o scădere mai accentuată a temperaturii la termocuplele poziționate lângă țevă, față de cele poziționate la jumătatea distanței dintre țevi. Spre sfârșitul procesului, după aproximativ 240 de minute, se observă o stabilizare a temperaturii în jurul valorii de -8°C .

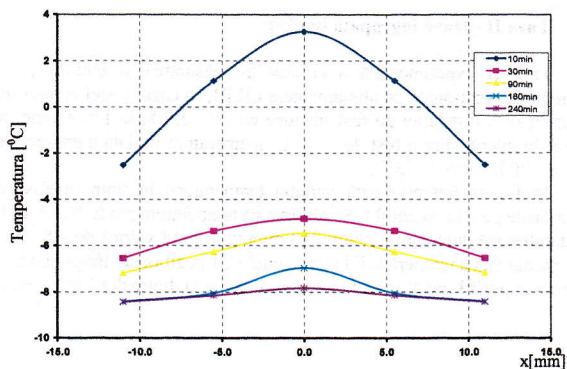


Fig.6.10 Variația temperaturii la diferite momente de timp între două țevi consecutive

6.6 Măsurarea temperaturii la suprafața pistei prin termografiere

În cadrul cercetărilor experimentale, pentru măsurarea temperaturii pe suprafața pistei am utilizat camera de termografiere FLIR A 20 din dotarea Catedrei Sisteme Termice și Ingineria Mediului (Figura 6.11).



Fig.6.11 Utilizarea camerei de termografiere pentru măsurarea temperaturii pe suprafața pistei

Utilizarea programului ThermoCam Researcher Professional 2.8 mi-a permis înregistrarea și prelucrarea datelor, precum și fotografierea suprafeței pistei la diverse momente de timp (Figura 6.12).

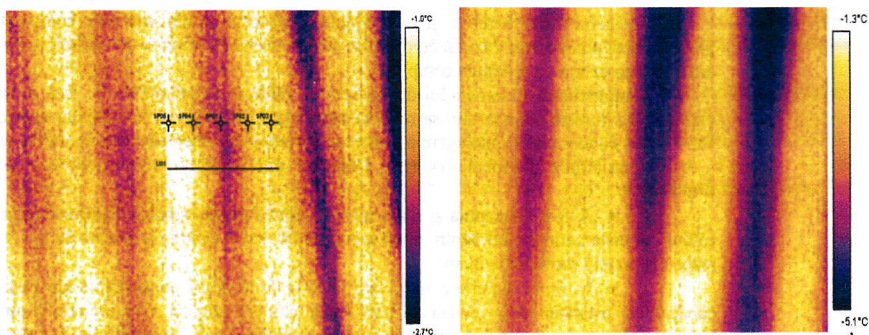


Fig.6.12 Termografierea pistei patinoarului

Din Figura 6.13 se observă că temperatura scade mai rapid în punctul de deasupra țevii (SP1) și mai lent în punctul poziționat între țevi (SP3). După 330 de minute temperaturile în cele cinci puncte devin aproximativ egale. Temperatura pe dreapta LI01 reprezintă practic media temperaturilor din punctele considerate

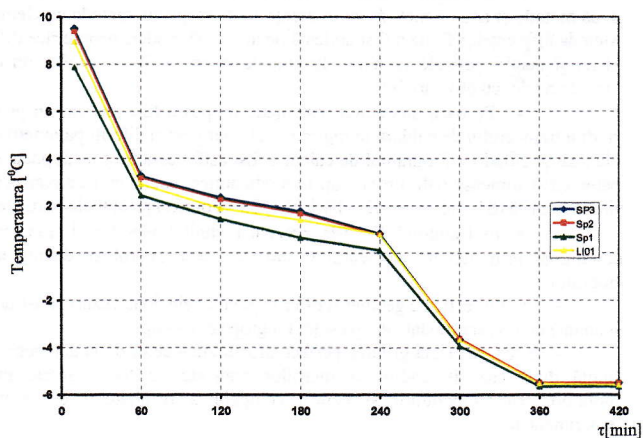


Fig.6.13 Variația temperaturii în timp în punctele SP₁,SP₂,SP₃ și pe dreapta LI01 în Faza I experimentală

7. Contribuții personale

Din cercetările teoretice și experimentale, precum și din analizele comparative cuprinse în prezenta teză de doctorat, rezultă cu pregnanță că procesul de transfer de căldură în pista unui patinoar artificial reprezintă un fenomen complex.

Complexitatea fenomenului de transfer de căldură cu schimbare de fază în regim nestaționar care are loc în pista patinoarului se reflectă asupra geometriei și performanțelor acesteia, necesitând o foarte bună cunoaștere și înțelegere a acestora, precum și un însemnat efort în studiul și modelarea lui.

Contribuțiile personale care se desprind din conținutul prezentei teze de doctorat sunt următoarele:

- A fost concepută și realizată o instalație pentru studiul experimental al transferului de căldură în pista patinoarului pentru două cazuri constructive diferite și anume cu țevi îngropate în nisip respectiv cu țevi scufundate în apă.

- În urma experimentelor, utilizând ambele tipuri constructive ale pistei, s-a confirmat capacitatea instalației de a realiza un transfer de căldură eficient între materialul supus înghețării și agentul refrigerant. În același timp s-a pus în evidență viteza variabilă de înaintare a frontului de solidificare, atât în cazul pistei cu țevi scufundate în apă cât și a pistei cu țevi îngropate în nisip.

- Experimentele au confirmat diferența dintre cele două tipuri constructive ale pistei, în ceea ce privește timpul total de solidificare, viteza de înaintare a frontului de solidificare și nu în ultimul rând calitatea gheții obținute.

- În cadrul studiului experimental s-au utilizat pentru monitorizarea, înregistrarea și prelucrarea datelor aparatură performantă de ultimă generație. Astfel pentru măsurarea temperaturii pe pistă s-a utilizat metoda termografierii suprafeței cu ajutorul camerei de termografie.

- În cadrul studiului teoretic al transferului de căldură în regim nestaționar s-au utilizat două metode și anume metoda cu diferențe finite respectiv metoda cu elemente finite (Capitolul III). Metoda diferențelor finite a fost aplicată pentru două modele geometrice diferite și anume pentru placa plană și pentru peretele cilindric. În ambele cazuri a fost dezvoltat un model matematic bazat pe metoda rețelei cu pas variabil.

- Pe baza modelului matematic propus a fost realizat un program de calcul ce permite studiul transferului de căldură în regim nestaționar pentru diferiți parametri de funcționare atât în cazul plan cât și cilindric. Programul de calcul a fost astfel conceput încât poate rula pentru o serie largă de parametri (dimensionali, proprietăți termodinamice, coeficienți de convecție) și cu orice condiție la limită impusă (S1 - Neuman, S2 - Dirichlet, S3 - Fourier) pe ambele părți ale domeniului analizat.

- În Capitolul IV este prezentat studiul teoretic al transferului de căldură în regim nestaționar prin metoda elementului finit. În acest capitol se disting următoarele contribuții ale autorului:

- au fost realizate geometrii diferite pentru cele două cazuri constructive ale pistei și anume cu țevi scufundate în apă și țevi îngropate în nisip.

- a fost realizată grilarea perfect structurată a celor două geometrii și impunerea condițiilor la limită după caz. În cadrul geometriilor realizate au fost inserate puncte și contururi pentru monitorizarea temperaturii și pentru compararea rezultatelor din simularea numerică cu cele experimentale.

- în cadrul metodei cu element finit s-au introdus proprietățile termofizice ale materialelor variabile funcție de temperatură

- pe baza rezultatelor obținute au fost trasate grafice care evidențiază variația diferitelor mărimi de interes și anume viteza de înaintare a frontului de solidificare, distribuția câmpului de temperatură pe anumite zone și influența parametrilor externi în funcție de timp.

- în exemplele numerice prezentate la sfârșitul capitolului sunt analizate influențele exercitate asupra fenomenului de solidificare a principalilor parametri termici, trasându-se curbele variație în timp a poziției și vitezei interfeței solid-lichid și a ratei de solidificare.

- pe baza rezultatelor obținute s-au evidențiat diferențele între cele două cazuri constructive ale pistei, în ceea ce privește timpul total de solidificare, viteza de deplasare a frontului de solidificare și distribuția diferită a câmpului de temperatură în jurul țevilor.

• Rezultatele comparative privind câmpul de temperatură în jurul țevilor pistei, prezentate în Capitolul VI, au pus în evidență evoluția temperaturii pe diferite aliniamente. S-au trasat grafice comparative între valorile obținute prin modelare numerică și cele obținute experimental. Pentru toate situațiile analizate, rezultatele numerice obținute prin modelare numerică prezintă abateri nesemnificative față de cele obținute experimental, acest lucru contribuind la validarea modelului matematic utilizat în cazul metodei cu element finit.

Bibliografie selectivă

- [1.] BEJAN A. - *Convection heat transfer* – John Wiley & Sons, Inc, 1995
- [2.] CHIRIAC F., s.a. - *Procese de transfer de caldura si masa in instalatiile industriale*, Editura Tehnica Bucuresti 1982.
- [3.] CHO S.H., SUNDERLAND J.E.- *Phase change of spherical bodies* – Int. J. Heat Mass. Transfer 13, 1970.
- [4.] COMAN G. - *Stadiul actual in constructia patinoarelor artificiale* - Referat doctorat I – 2007- Universitatea “Dunarea de Jos” Galati.
- [5.] COMAN G. – *Transfer de caldura in regim nestationar cu aplicatii la patinoare artificiale* - Referat doctorat II - 2008 - Universitatea “Dunarea de Jos” Galati.
- [6.] COMAN G. - *Cercetari teoretice si experimentale privind campul de temperatura in constructia patinoarelor* - Referat doctorat III - 2009 - Universitatea “Dunarea de Jos” Galati.
- [7.] COMAN G., S. PARASCHIV, V. DAMIAN – *Aspects regarding the modeling of thermic transfer processes in environments with change phase with a plane geometry* - 3rd International Conference on Thermal Engines and Environmental Engineering METIME 2009, ISBN 978-973-627-442-8, pag 129-133, Editura Fundatiei Universitare „Dunarea de Jos” Galati.
- [8.] COMAN G., IOSIFESCU CR., DAMIAN V. - *Finite differences analysis of ice formation outside a flat wall*, *International Conference* - ACME-2010, Univ. „Gh. Asachi” Iasi, Buletinul Inst. Pol. din Iasi, Tomul LVI (LX), Fasc. 4B.2010, Sectia Constructia de Masini, ISSN-1011-2855, B+, 17-18.mai, 2010, pag. 177-187.
- [9.] COMAN G., IOSIFESCU CR., DAMIAN V. - *Finite differences analysis of water solidification outside a flat wall* – NACOT-2011- National Conference of Thermodynamics with International Participation – Craiova 2011.
- [10.] CUJBA LUMINITA, COMAN GELU - *The utilization solar energies in see reduce negative environmental impacts and consumptions of conventional energy*. Analele Universitatii din Craiova Vol.IX (XLV)-2004.
- [11.] DAMIAN V., IOSIFESCU CR., COMAN G. – *TERMOTEHNICA*, Ed. Academiei, ISBN-973-8316-76-6, Galati, 2004.
- [12.] DAMIAN V., COMAN G. – *Establishing wet vapour title through lamination and static condensation*. Analele Univ. „Dunarea de Jos”-Galati, Fascicola IV, ISSN 1221-4558, 2007, pag. 23-25.
- [13.] DUMITRASCU GH., HORBANIUC B. - *Model numeric pentru transformare de faza lichid-solid neizoterma*, Galati 1993.
- [14.] POPESCU F., ANDREI V., ARITON V. – *Metode numerice aplicate in inginerie*, Fundatia Academica 2001, pp 21-50.
- [15.] IORDACHE F., BALTARETU F. – *Modelarea si simularea proceselor dinamice de transfer termic*, Editura Matrix Bucuresti, 2002.
- [16.] HALE N.W., VISKANTA R. - *Solid – liquid phase – change heat transfer and interface motion in materials cooled or heated from above and below*, Int.J.Heat Mass Transfer, 1980.
- [17.] HEINE D., ABHAT A. - *Investigation of physical and chemical properties of phase-change materials for space heating/cooling applications*. International Solar Energy Congress, New Delhi, India 1978.
- [18.] HERA D., DRUGHEAN L., GIRIP A. – *Miercurea Ciuc skating rink modernisation*, Revista Instalatorul no.8/2002, pp 19-22.
- [19.] HORBANIUC H. – *Taza de doctorat* – Universitatea tehnica “Gh. Asachi” Iasi 1996.

- [20.] IOSIFESCU CR., COMAN G., DAMIAN V.- *Finite Differences Analysis Of Iceformation Outside A Cylindrical Wall*, (Cofret-2010), Iași, Buletinul Inst. Pol. din Iași, Tomul LVI (LX), Fasc. 3a, 2010, Secția Construcția de Mașini, ISSN-1011-2855, B+, 5-7 Mai, 2010, Pag. 207-216.
- [21.] INCROPERA F.P., DEWITT D.P. - *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley and Sons 1990.
- [22.] LAZARIDIS A. - *A numerical solution of the multidimensional solidification (or melting) problem*, Int.J. Heat Mass Transfer, Vol 13, 1970.
- [23.] LEWIS R.W., MORGAN K., ZIENKIEWICZ O.C. - *An improved algorithm for heat conduction problems with phase change*. Int JI. for Numerical Methods in engineering, vol 12, pp 1191-1195, 1978.
- [24.] LEWIS R.W., HUANGH.C. - *A finite element analysis of fire resisting cabinets using an adaptive remeshing technique*. Applied Mathematical Modelling, vol 21, 1991.
- [25.] MARIA NEAGU - *Modelarea numerica a fenomenelor termice* - Edirura Tehnopress, Iasi 2005.
- [26.] MIRON VALERIA - *Aparate schimbatoare de caldura* - Recomandari privind calculul termic - Galati 1999, pp 56-70.
- [27.] MINEA A.A. - *Tehnici de simulare a proceselor termogazodinamice*, Editura Matrix, Bucuresti, 2010.
- [28.] PATANKAR S.V. - *Numerical heat transfer and fluid flow* - Taylor & Francis, 1980, Philadelphia.
- [29.] PAVLOV P.A. - *Heat and mass transfer under the conditions of rapid heating* - Heat Trans. Res. No.1-2/2004.
- [30.] PEDROSO R.J., DOMOTO G.A. - *Perturbation solution for spherical solidification of saturated liquids*, J. of Heat Transfer 1977.
- [31.] PERETZ R., HORBANIUC B. - *Optimal heat pipe heat exchanger design*, J.Heat Recovery Systems, vol. 4, 1984.
- [32.] POOTS G. - *An approximate treatment of a heat conduction problem involving a two-dimensional solidification front*, Int.J. Heat Mass Transfer, vol.5.
- [33.] PORNEALA SAVA, COMAN GELU, PORNEALA CRISTIAN - *A STUDY CONCERNING POSSIBILITIES OF HEAT RECOVERY FROM A HOT SLAB*. First International Conference "Advanced Concepts in Mechanical Engineering", 8-10 July 2004, Technical University "Gh. Asachi" of Iasi.
- [34.] PORNEALA S. - *Tehnologia utilizarii frigului artificial* - Editura Fundatiei Universitare "Dunarea de jos" Galati, 2007, pp 197-221.
- [35.] PORNEALA S., PORNEALA Cr. - *Procese in instalatii frigorifice si pompe de caldura-vol I, II* - Editura Fundatiei Universitare "Dunarea de jos" Galati, 2007.
- [36.] VLASIE SILVIU - *Teza de doctorat* - Universitatea Dunarea de jos Galati, 1997
- [37.] FLUENT 6.3 - User's guide. Fluent Inc.
- [38.] GAMBIT 2.3 - User's guide. Fluent Inc.
- [39.] YORK - Refrigeration aggregate for skating rink, 2001.
- [40.] WILO - Dry rotor pumps catalogue, 2000/2001.
- [41.] DIXELL - Catalog produse 2010.



266. DTG .