

Pornirea incalzirii intr-o incapere rece. Comportamentul termic al unui perete exterior tristrat

Turning the heating in a cool room. The thermal behavior of a three-layer outer wall

Prof. dr. ing. Florin Iordache

Universitatea Tehnica de Constructii București
Bulevardul Lacul Tei 122-124, Sector 2, București, Romania
E-mail: fliord@yahoo.com

Rezumat: Lucrarea urmareste in regim termic nestationar declansarea procesului de incalzire a unui perete rece format din 2 categorii de straturi : un strat masiv de beton armat si unul sau doua straturi de izolatie termica plasate pe suprafetele stratului de beton armat. Se prezinta o posibilitate simplificata de modelarea a proceselor de transfer termic in regim nestationar in 2 variante de incalzire a peretelui.

Se stabilesc rezultate privind comportamentul termic dinamic al peretelui in 2 cazuri de aranjare a straturilor peretelui si anume stratul de izolatie termica la interior in cazul intai si apoi in cazul al doilea stratul de izolatie termica la interior.

Rezultatele obtinute au vizat evolutia in timp a temperaturilor, densitatilor de flux termic si a densitatilor de energie pe fetele si in interiorul peretelui.

Abstract: The paper aims in unsteady state thermal regime to watch start the heating process of a cold wall with two or tree layer consists of two categories: a massive layer of reinforced concrete and one or two layers of insulation, placed on reinforced concrete surfaces. It shows a simplified process modeling possibility of unsteady state heat transfer in 2 scenario to heating the wall.

The results establish the dynamic thermal behavior of the wall in 2 cases the arrangement of layers : the case first - the wall insulation layer on the inner surface of the reinforced concrete layer, and the second case – the layer of insulation on the outer surfaces of the reinforced concrete layer.

The results focused on the time evolution of temperature, heat flux density and energy density on the surfaces and inside the wall.

1. Introducere

Lucrarea are ca obiectiv de a analiza cum se realizeaza regimul nestationar in cadrul unui perete exterior compus din 2 categorii de straturi : cu capacitate mare de acumulare termica si rezistenta termica scazuta si cu capacitate mica de acumulare termica si rezistenta termica mare.

Tinand seama de aceste aspect, modelul abordat a presupus un perete masiv de beton armat avand caracteristicile : $\delta_{BA} = 0.20$ m, $\lambda_{BA} = 1.75$ W/m.K, $\rho_{BA} = 2500$ kg/m³, $c_{BA} = 840$ J/kg.K si 2 straturi de material izolant termic, care sunt pozate la interior si respectiv la exterior, avand caracteristicile : $\delta_{IZI} = 0.001$ m, $\lambda_{IZI} = 0.04$ W/m.K, $\rho_{IZI} = 20$ kg/m³, $c_{IZI} = 1460$ J/kg.K, si $\delta_{IZE} = 0.099$ m, $\lambda_{IZE} = 0.04$ W/m.K, $\rho_{IZE} = 20$ kg/m³, $c_{IZE} = 1460$ J/kg.K.

In cazul straturilor de izolatie termica, caracteristici precum densitatea si caldura specifica nu sunt necesare in cazul modelelor de bilant termic adoptate. Se formeaza astfel un sandwich avand la mijloc betonul armat. Coeficientii superficiali de transfer termic pe fetele peretelui s-au considerat avand valorile $\alpha_i = 8$ W/m².K si $\alpha_e = 20$ W/m².K;

Din punct de vedere al modului de pornire al incalzirii se vor analiza 2 variante:

- Varianta 1, caracterizata de :
 - o temperatura interioara constanta : $t_i = 20^\circ\text{C}$; si
 - o temperatura exterioara constanta : $t_e = -10^\circ\text{C}$;
- Varianta 2, caracterizata de :
 - o Putere termica constanta furnizata la interior egala cu puterea de regim stationar la care se va ajunge dupa perioada de stabilizare a regimului termic in perete.

In varianta 1 de alimentare cu caldura, puterea termica furnizata este variabila de la valori mari la inceput pana se ajunge in regim stationar de transfer termic cand puterea termica livrata se aseaza pe aceasta valoare. In varianta 2 de alimentare cu caldura, puterea termica fiind constanta permanent pe valoarea de regim stationar regimul de incalzire in interior este lent ajungandu-se la o valoare acceptabila de confort termic interior ($t_{ic} = 19.0^\circ\text{C}$) dupa un timp relativ mai scurt sau mai indelungat in functie de structura sandwich-lui peretelui.

In ceea ce priveste situatia initiala a temperaturilor, in perete se va considera ca pe intrega grosime a peretelui este temperatura exterioara considerata.

2. Modelare proceselor de transfer termic

Modelul de lucru abordat va fi un model aproximativ (destul de bun din punct de vedere practic) care permite o rezolvare analitica a unei ecuatii diferentiale liniare de ordinul 1 la care se ajunge in urma bilantului termic in regim nestationar in care se va trata problema transferului termic prin peretele multistrat.

a. Analiza variantei 1 :

Asa cum s-a mentionat ipotezele care definesc aceasta varianta sunt :

Pornirea incalzirii intr-o incapere rece. Comportamentul termic al unui perete exterior tristrat

- o temperatura interioara constanta : $t_i = 20^\circ\text{C}$; si
- o temperatura exterioara constanta : $t_e = -10^\circ\text{C}$;
- o temperatura interioara perete initiala : $\theta_0 = -10^\circ\text{C}$;

La fel, cum s-a mentionat mai inainte, in varianta 1 de alimentare cu caldura puterea termica furnizata este variabila de la valori mari la inceput pana se ajunge in regim stationar de transfer termic cand puterea termica livrata se aseaza pe aceasta valoare. Dat fiind densitatea foarte mica a straturilor de izolatie se va considera ca ele nu participa la procesul de acumulare termica ci numai la izolarea termica a stratului de beton armat.

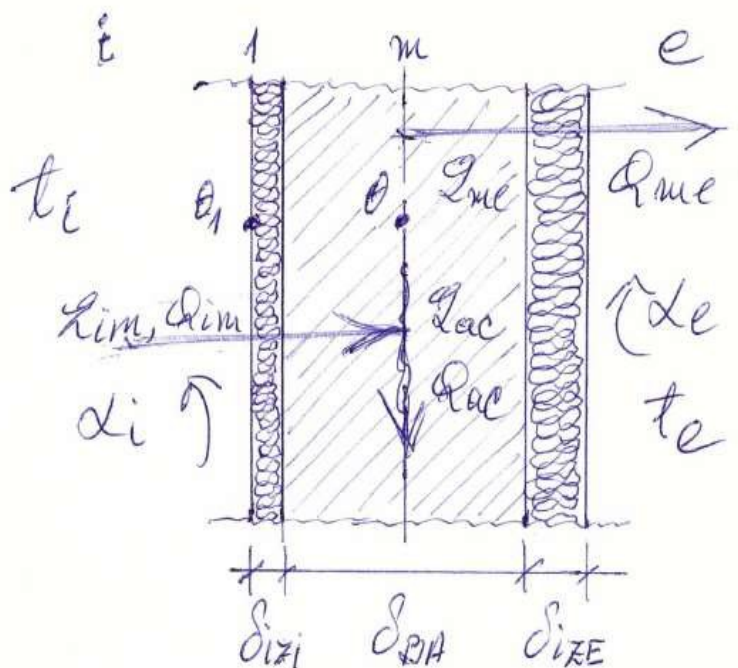


Fig.1 – Peretele de beton armat cu straturile de izolatie

In cadrul modelului de bilant termic in regim nestationar al peretelui exterior de tip sandwich bilantul termic global al peretelui se scrie (fig. 1) :

$$\frac{t_i - \theta}{R_{im}} = (\delta \cdot \rho \cdot c)_{BA} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} + \frac{\theta - t_e}{R_{me}} \quad (1)$$

unde :

$$R_{im} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_{IZI}}{\lambda_{IZI}} + \frac{\delta_{BA}}{2 \cdot \lambda_{BA}} \quad (2)$$

$$R_{me} = \frac{1}{\alpha_e} + \frac{\delta_{IZE}}{\lambda_{IZE}} + \frac{\delta_{BA}}{2 \cdot \lambda_{BA}}$$

si

$$U_{im} = \frac{1}{R_{im}} \quad (3)$$

$$U_{me} = \frac{1}{R_{me}}$$

Introducand transmitantele in ecuatia de bilant (1) si prelucrand-o in sensul aducerii la o forma canonica se obtine :

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{1}{C_T} \cdot \theta + \frac{1}{C_T} \cdot t^* \quad (4)$$

unde :

$$C_T = \frac{(\delta \cdot \rho \cdot c)_{BA}}{U_{im} + U_{me}} \quad (5)$$

$$t^* = \frac{U_{im} \cdot t_i + U_{me} \cdot t_e}{U_{im} + U_{me}}$$

Conform ipotezelor prezentate rezulta ca solutie analitica a ecuatiei diferentiale liniare (4) solutia :

$$\theta(\tau) = t^* + (\theta_0 - t^*) \cdot E^\tau \quad (6)$$

unde :

$$E = \exp\left(-\frac{1}{C_t}\right) \quad (7)$$

Densitatile de flux termic intrate si respectiv iesite din perete se pot evalua cu:

$$q_{im} = U_{im} \cdot (t_i - \theta) \quad (8)$$

$$q_{me} = U_{me} \cdot (\theta - t_e)$$

Important este de urmarit si densitatea de flux termic acumulata in perete. Relatia de evaluare a densitatii de flux termic acumulat s-a stabilit pe baza derivatei functiei de temperatura in stratul de beton armat in raport cu timpul si a rezultat :

$$q_{ac} = (\delta \cdot \rho \cdot c)_{BA} \cdot \frac{t^* - \theta_0}{C_T} \cdot E^\tau \quad (9)$$

Temperatura pe fata interioara a peretelui se va stabili pe baza bilantului termic

Pornirea incalzirii intr-o incapere rece. Comportamentul termic al unui perete exterior tristrat

de regim stationar realizat la fata interioara a peretelui exterior :

$$\frac{t_i - \theta_1}{R_{i1}} = \frac{\theta_1 - \theta}{R_{1m}} \quad (10)$$

unde :

$$R_{i1} = \frac{1}{\alpha_i} \quad (11)$$

$$R_{1m} = \frac{\delta_{IZI}}{\lambda_{IZI}} + \frac{\delta_{BA}}{2 \cdot \lambda_{BA}}$$

Si rezulta in final :

$$\theta_1 = \frac{U_{i1} \cdot t_i + U_{1m} \cdot \theta}{U_{i1} + U_{1m}} \quad (12)$$

unde :

$$U_{i1} = \frac{1}{R_{i1}} \quad (13)$$

$$U_{1m} = \frac{1}{R_{1m}}$$

O alta categorie de marimi a caror evolutie trebuie urmarita in timp sunt :

- energia termica intrata in perete,
- energia termica iesita din perete si
- energia termica acumulata in perete

Relatiile de determinarea a acestor marimi se stabilesc pe baza integrarii in timp a densitatilor de flux termic intrate si iesite din perete si a densitatii de flux termic acumulate in perete. Rezulta destul de simplu urmatoarele expresii de determinarea a acestor densitati de energie termica :

$$Q_{im} = U_{im} \cdot \left[(t_i - t^*) \cdot \tau - (\theta_0 - t^*) \cdot C_T \cdot (1 - E^\tau) \right] \quad (14)$$

$$Q_{me} = U_{me} \cdot \left[(t^* - t_e) \cdot \tau + (\theta_0 - t^*) \cdot C_T \cdot (1 - E^\tau) \right] \quad (15)$$

$$Q_{ac} = (\delta \cdot \rho \cdot c)_{BA} \cdot (t^* - \theta_0) \cdot (1 - E^\tau) \quad (16)$$

In continuare, deocamdata se prezinta grafic cateva rezultate obtinute in situatia in care izolatia termica se prevede numai pe exterior. Reamintim ca varianta 1

presupune o temperatura interioara constanta pe valoarea de 20°C ceea ce este de asteptat ca implica un flux termic variabil la intrarea in perete.

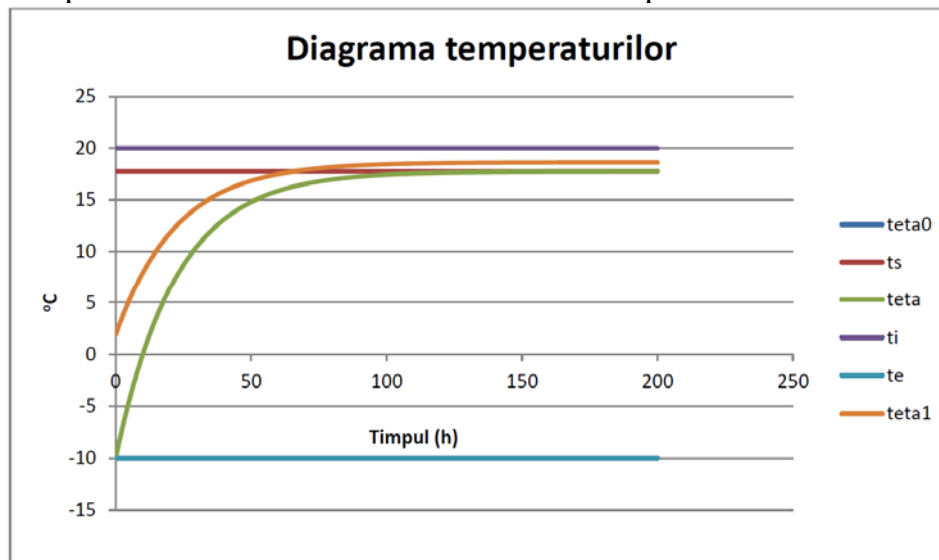


Fig. 2

In fig. 2 curba verde urmareste evolutia in timp a temperaturii din axa de simetrie a stratului de beton armat (θ), iar curba portocalie urmareste variatia in timp a temperaturii pe fata interioara peretelui (θ_1). Se observa cum dupa cca. 100 de ore cele doua temperaturi intra pe valorile stabilizate de regim stationar.

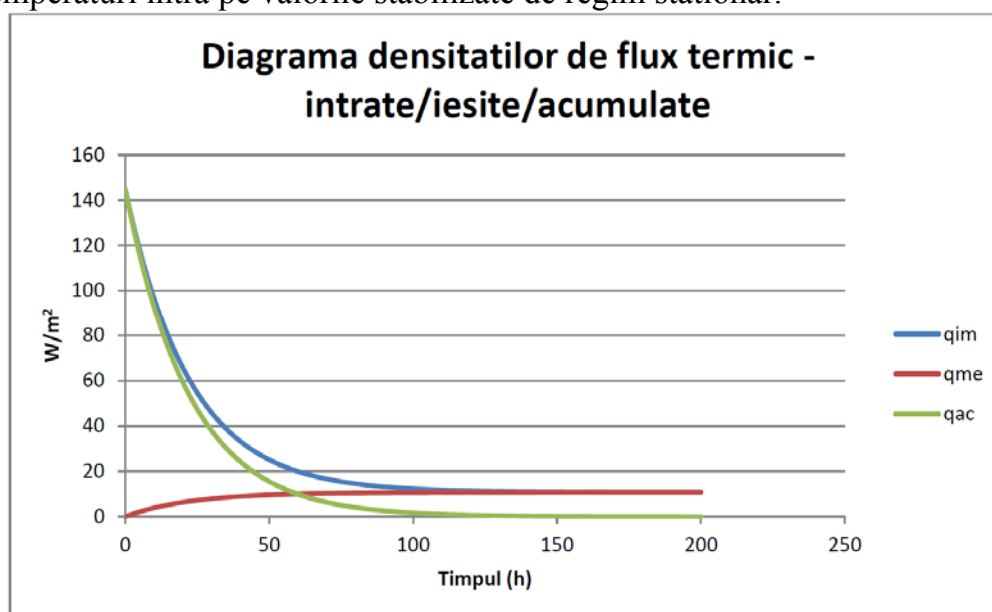


Fig. 3

In fig. 3 se prezinta evolutia in timp a densitatii fluxului termic care intra in perete (q_{im} – curba albastra), a densitatii fluxului termic care iese din perete (q_{me} – curba maro) si a densitatii de flux termic care se acumuleaza in stratul de beton armat (q_{ac} – curba verde).

Se observa ca impunerea unei temperaturi interioare de 20°C de la inceput conduce la o densitate de flux termic de intrare mare in perete, densitate de flux care in timp scade pe masura ce temperatura stratului de beton armat creste. In acelasi timp densitatea de flux termic de la stratul de beton armat spre exterior porneste de la 0 si creste usor tinzand dupa cca. 100 h la o valoare stabilizata egala cu valoarea la care scade densitatea de flux termic care intra in perete. Aceasta semnifica faptul ca practic s-a intrat in regimul stationar cand fluxul termic intrat este egal cu fluxul termic iesit, fluxul termic acumulat fiind nul. Curba verde ce reflecta evolutia densitatii de flux termic acumulat evidentiaza dupa cum se observa din fig. 2 acest lucru.

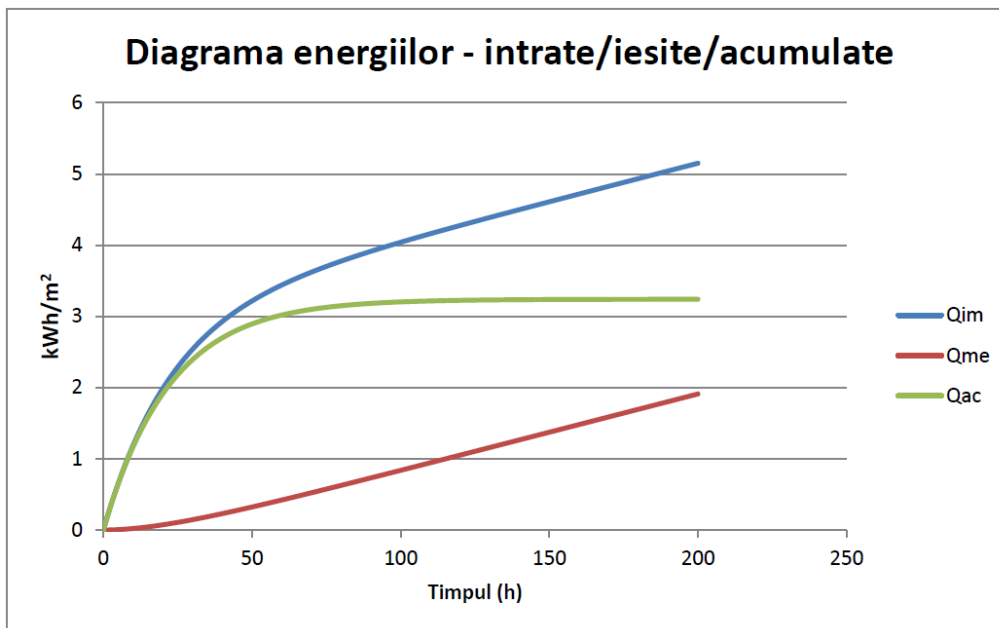


Fig. 4

In fig. 4 se prezinta evolutia in timp densitatilor de energie termica intrata (Q_{im} – curba albastra), iesita (Q_{me} – curba maro) si acumulata (Q_{ac} – curba verde) in perete. Se observa ca, cantitatea de energie termica intrata in perete are o crestere rapida la inceput dupa care usor se stabilizeaza pe o crestere constanta dat fiind intrarea in regim termic stationar al peretelui. In acelasi timp cantitatea de energie iesita din perete creste incet pana de asemenea se stabilizeaza pe valoarea de regim stationar reflectata de ritmul constant de crestere. Cantitatea de energie acumulata in perete are o crestere rapida la inceput dupa care se stabilizeaza pe valoarea constanta de regim stationar dupa cum o atesta si curba verde din fig. 4.

b. Analiza variantei 2

In cazul variantei a doua, tot relatia (1) de bilant termic in regim nestationar este valabila insa este impusa valoarea puterii termice exprimata de fiecare din cei doi membri ai ecuatiei de bilant (1) :

$$\frac{t_i - \theta}{R_{im}} = (\delta \cdot \rho \cdot c)_{BA} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} + \frac{\theta - t_e}{R_{me}} = p_s \quad (17)$$

In relatia (17), asa cum s-a mentionat, densitatea de putere termica p_s este cea de regim stationar, care se va stabili in perete la sfarsitul regimului nestationar, si care, dupa cum se observa foarte usor, are valoarea :

$$p_s = \frac{t_i - t_e}{R_{im} + R_{me}} = \frac{t_i - t_e}{R_{ie}} \quad (18)$$

Ecuatia de bilant termic in regim nestationar care trebuie rezolvata in acest caz este ecuatia prezentata in relatia (17) si care este formata din ultima egalitate a relatiei (17). Prelucrand aceasta relatie se obtine ecuatia diferentiala liniara de ordinul 1, care are aceeasi forma cu cea prezentata in relatia (4) :

$$\frac{d\theta}{d\tau} = -\frac{1}{C_T} \cdot \theta + \frac{1}{C_T} \cdot t^* \quad (4)$$

unde de aceasta data :

$$C_T = \frac{(\delta \cdot \rho \cdot c)_{BA}}{U_{me}} \quad (19)$$

$$t^* = t_e + \frac{p_s}{U_{me}}$$

Solutia ecuatiei deferentiale (4) este data de relatia (6) :

$$\theta(\tau) = t^* + (\theta_0 - t^*) \cdot E^{-\tau} \quad (6)$$

Cunoscand acum temperatura θ conform relatiei (6) se poate determina temperatura interioara utilizand egalitatea dintre primul si ultimul termen al relatiei (17) si se obtine :

$$t_i = \theta + \frac{p_s}{U_{im}} \quad (20)$$

Temperatura pe fata interioara a peretelui (θ_1) se va stabili, la fel cu relatia (12).

In ceea ce priveste densitatea de flux termic intrat in perete ea este constanta in timp, valoarea ei fiind p_s . Densitatea de flux termic iesit din perete va fi dat de relatia (8₂) iar densitatea de flux termic acumulata in perete se stabileste cu relatia (9).

$$q_{ac} = (\delta \cdot \rho \cdot c)_{BA} \cdot \frac{t^* - \theta_0}{C_T} \cdot E^{-\tau} \quad (9):$$

Pornirea incalzirii intr-o incapere rece. Comportamentul termic al unui perete exterior tristrat

in care insa bineinteles, constanta de timp C_T , E si temperatura t^* vor fi cele corespunzatoare variantei 2 in care ne aflam acum.

Energia termica intrata in perete se va stabili de aceasta data cu :

$$Q_{im} = p_s \cdot \tau \quad (21)$$

Iar pentru determinarea energiilor iesite si acumulate in perete se vor utiliza relatiile (15) si (16) :

$$Q_{me} = U_{me} \cdot \left[(t^* - t_e) \cdot \tau + (\theta_0 - t^*) \cdot C_T \cdot (1 - E^\tau) \right] \quad (15)$$

$$Q_{ac} = (\delta \cdot \rho \cdot c)_{BA} \cdot (t^* - \theta_0) \cdot (1 - E^\tau) \quad (16)$$

in care insa bineinteles, constanta de timp C_T , E si temperatura t^* vor fi cele corespunzatoare variantei 2 in care ne aflam acum.

La fel ca in cazul variantei 1, se prezinta grafic cateva rezultate obtinute in cazul variantei 2, in situatia in care izolatia termica se prevede numai pe exterior. Varianta 2 de functionare, dupa cum s-a precizat, presupune un flux termic intrat in perete constant pe valoarea de regim stationar care se va stabili practic la un moment mai indepartat de timp. Este de asteptat ca in aceasta varianta ritmul de incalzire al peretelui sa fie mai lent si timpul de stabilizare pe regimul termic stationar mai indelungat.

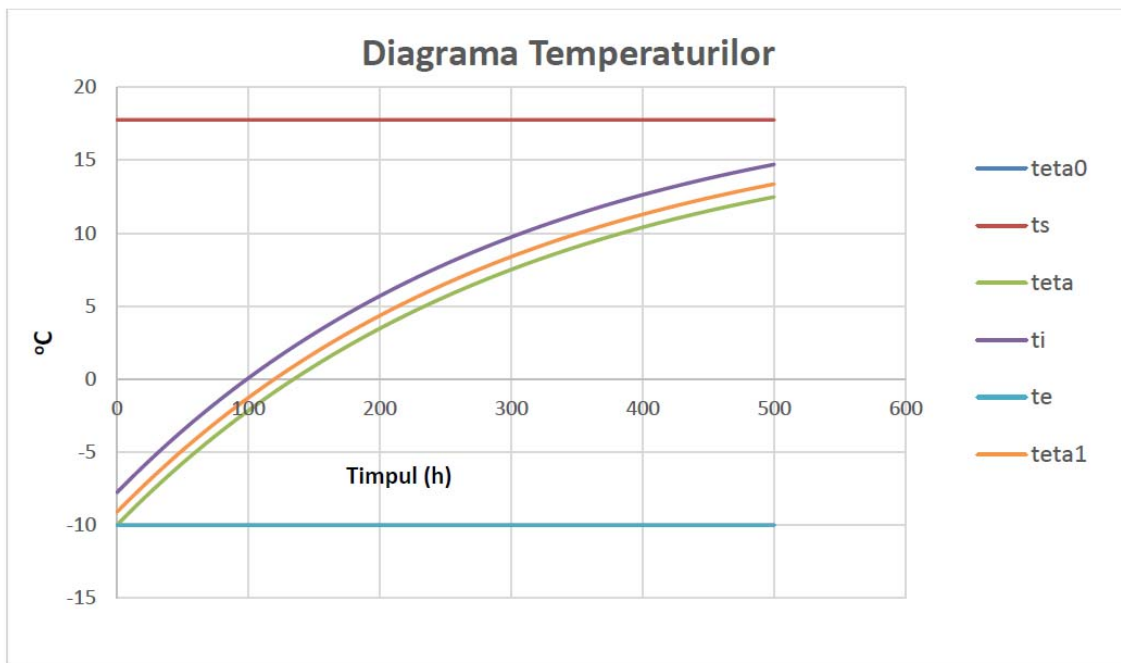


Fig. 5

In fig. 5 se prezinta evolutia temperaturilor reprezentative si anume : temperatura medie a stratului de beton armat (θ - curba verde), temperatura interioara (t_i - curba mov) si temperatura pe fata interioara a peretelui (θ_1 - curba portocalie). Se observa ca dupa 500 de ore, tot inca nu s-a intrat in regim termic stationar.

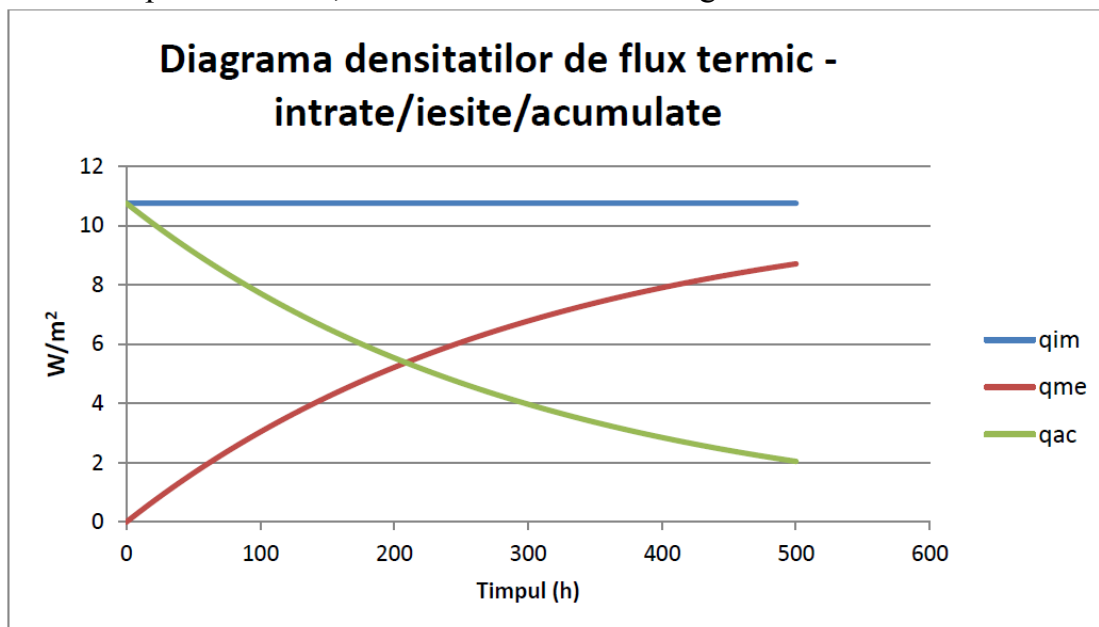


Fig. 6

In fig. 6 se prezinta evolutia in timp a densitatilor de flux termic intrate in perete (q_{im} - linia orizontala albastra), iesite din perete (q_{me} - curba maro) si acumulate in in perete (q_{ac} - curba verde). Se constata acelasi lucru, ca dupa 500 ore tot nu s-a stabilizat regimul stationar.

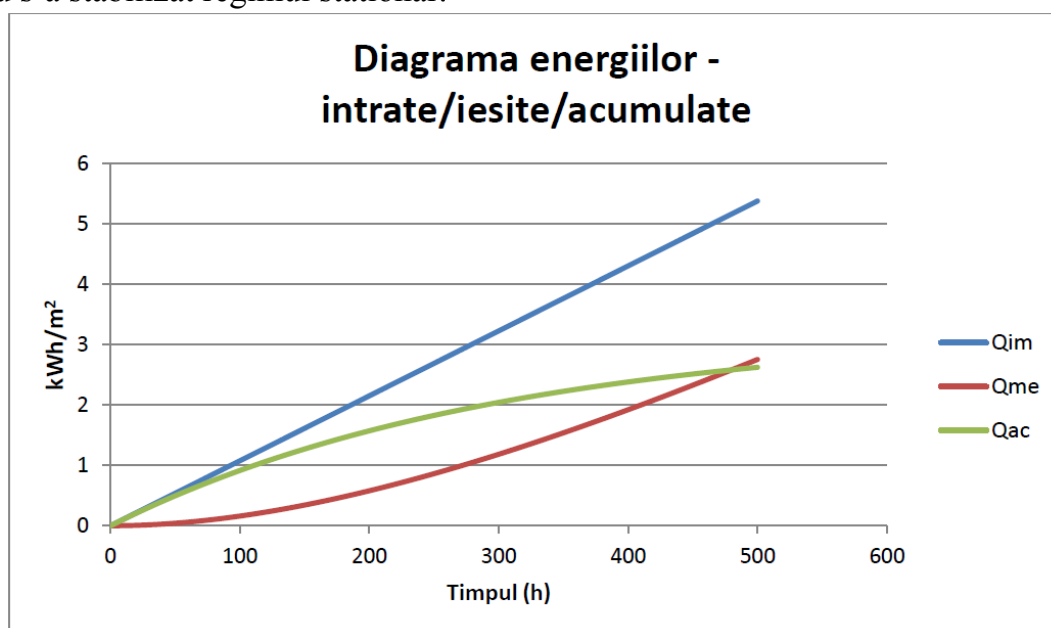


Fig. 7

Pornirea incalzirii intr-o incapere rece. Comportamentul termic al unui perete exterior tristrat

In fig. 7 se prezinta evolutia in timp a densitatilor de energie intrate in perete (Q_{im} - linia dreapta albastra), iesite din perete (Q_{me} - curba maro) si acumulate in perete (Q_{ac} - curba verde). Se observa ca fluxul termic intrat in perete fiind constant, ritmul de creste al cantitatii de energie termica intrata in perete este constant fapt atestat de linia albastra din fig. 7. Cantitatea de energie termica iesita si acumulata in perete au ritmuri variabile in functie de evolutia in timp a temperaturii medii a stratului de beton armat.

Data fiind durata destul de mare in care se intra intr-un regim termic stabilizat in varianta a 2-a, se poate considera ca in situatii de pornire a unei instalatii de incalzire intr-o cladire rece se va adopta o varianta apropiata de varianta 1 de alimentare. O analiza interesanta se obtine din comparatia rezultatelor obtinute in cazul prezentat, in care izolatia termica este plasata numai pe exterior (cazul prezentat in figurile 2...4) si cazul in care stratul de izolatie termica este pozat numai pe interior. Se prezinta in continuare diagramele din fig. 8, 9 si 10, care sunt omoloage diagramelor din figurile 2, 3 si 4 insa pentru cazul cu izolatia termica de 10 cm pe fata interioara a peretelui si sursa de energie functionand in varianta 1.

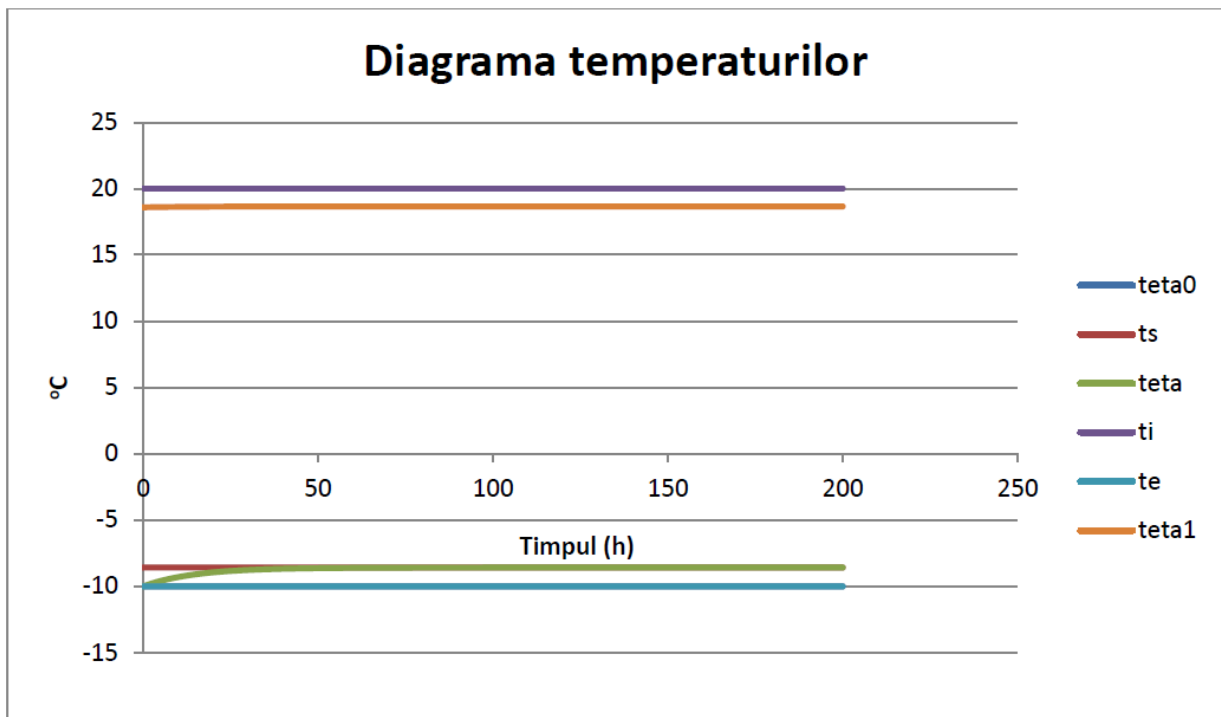


Fig. 8

Se remarca din fig. 8 ca temperatura pe suprafata interioara a peretelui este satisfacatoare chiar de la inceput insa, in interiorul peretelui, in stratul de beton armat, temperatura este extrem de scazuta ceea ce favorizeaza evident riscul la condens.

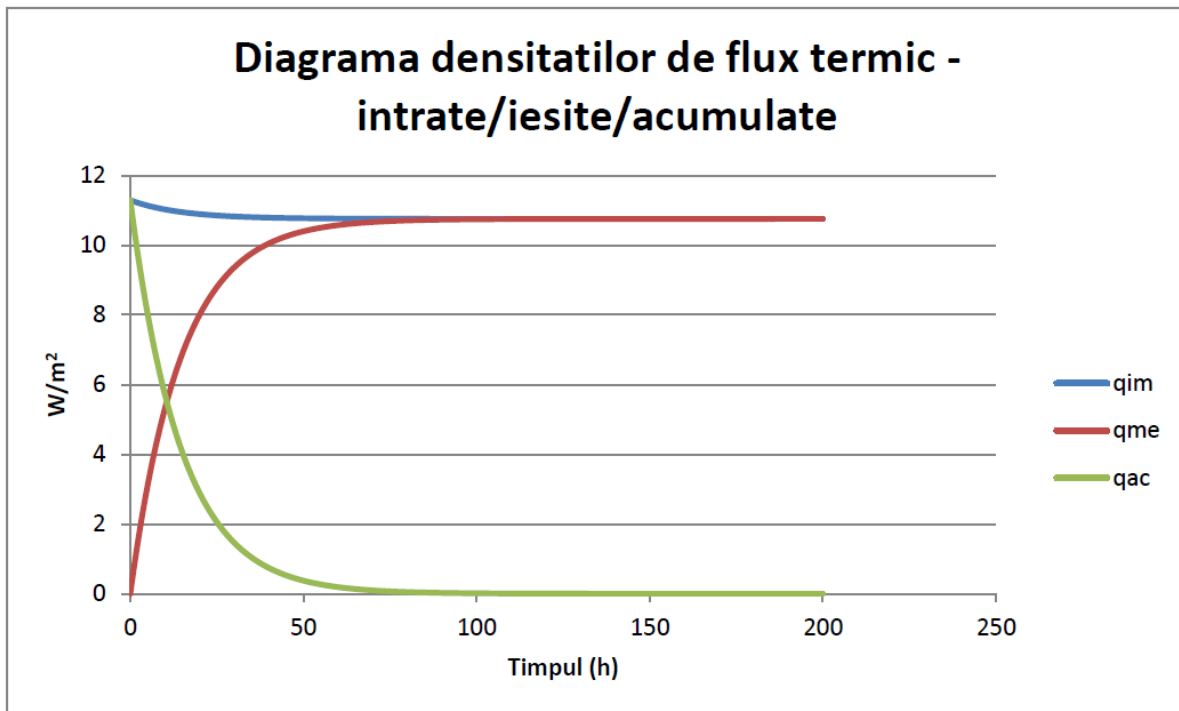


Fig. 9

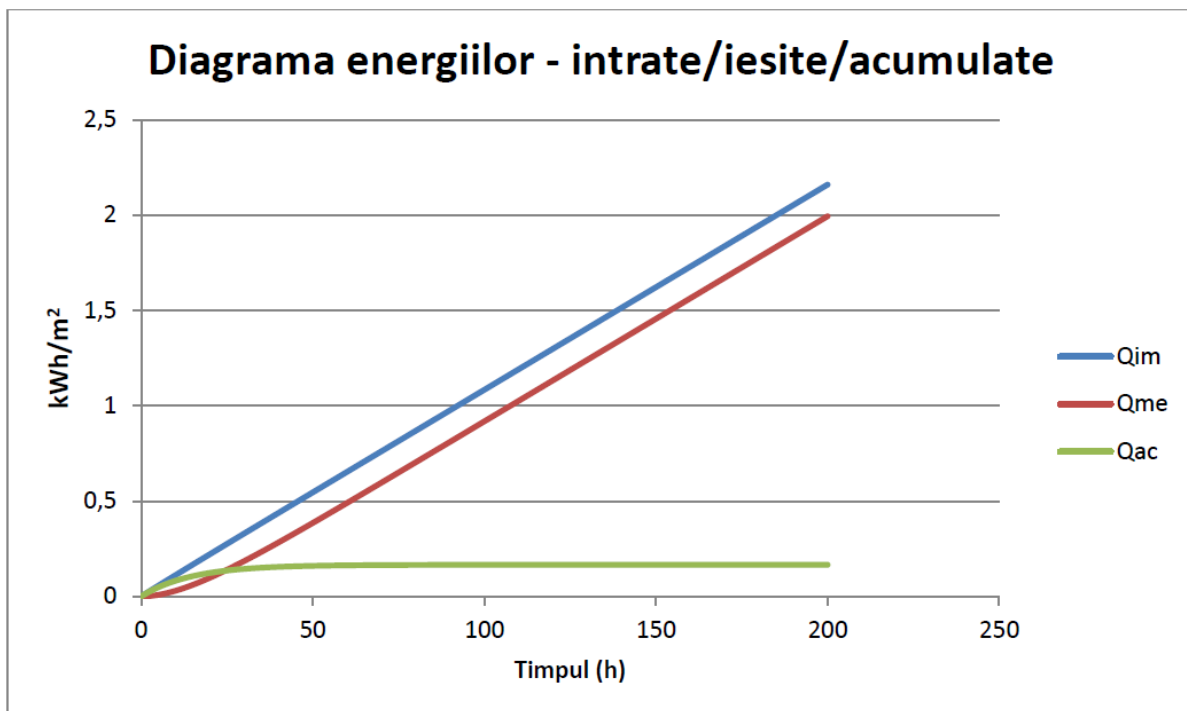


Fig. 10

Din analiza comparata a fig. 10 cu omoloaga ei fig. 4 se observa ca energia intrata in perete dupa 200 ore este de peste 2 ori mai mare in cazul pozarii stratului de izolare termica la exterior fata de cazul pozarii stratului de izolare termica la interior.

3. Concluzii

In lucrarea de fata obiectivul de baza a fost de a prezenta o posibilitate de modelare simplificata a transferului termic in regim nestationar intr-un perete exterior bistrat, modelare care ofera destul de usor obtinerea unor rezultate practice cu utilitate in intelegerea desfasurarii proceselor termice si aspectelor energetice asociate lor.

S-au analizat doua variante de incarcare termica a peretelui bistrat: cu temperatura constanta in mediul interior si cu flux termic constant pe fata interioara a peretelui, avand valoarea fluxului termic de regim stationar.

Rezultatele obtinute sunt prezentate grafic atat in cazul in care stratul de material izolant termic este pozat la exterior cat si in cazul in care este pozat la interior. Consecintele termice si energetice sunt complet diferite si se intelege valentele si deficientele fiecaruia din cazurile de pozare a straturilor componente ale peretelui.

Lista de Notatii

t_i - temperatura interioara, °C;
 t_e - temperatura exterioara, °C;
 θ - temperatura in axa de simetrie a startului de beton armat, °C;
 θ_0 - temperatura initiala in intrega masa a peretelui, °C;
 θ_1 - temperatura pe fata interioara a peretelui, °C;
 t^* - temperatura sintetica externa peretelui, °C;
 δ_{IZI} - grosimea statului de izolatie termica interior, m;
 δ_{BA} - grosimea stratului de beton armat, m;
 δ_{IZE} - grosimea statului de izolatie termica exterior, m;
 λ_{IZI} - conductivitatea termica a stratului de izolatie termica interior, W/m.K;
 λ_{BA} - conductivitatea termica a stratului de beton armat, W/m.K;
 λ_{IZE} - conductivitatea termica a stratului de izolatie termica exterior, W/m.K;
 ρ_{IZI} - densitatea stratului de izolatie termica interior, kg/m³;
 ρ_{BA} - densitatea stratului beton armat, kg/m³;
 ρ_{IZE} - densitatea stratului de izolatie termica exterior, kg/m³;
 c_{IZI} - caldura specifica masica a stratului de izolatie termica interior, J/kg.K;
 c_{BA} - caldura specifica masica a stratului de beton armat, J/kg.K;
 c_{IZE} - caldura specifica masica a stratului de izolatie termica exterior, J/kg.K;
 α_i - coeficientul superficial de transfer termic la fata interioara a peretelui, W/m².K;
 α_e - coeficientul superficial de transfer termic la fata exterioara a peretelui, W/m².K;
 τ - timpul curent, s;
 R_{ie} - rezistenta termica totala a peretelui, m².K/W;

R_{im} - rezistența termică între mediul interior și axa de simetrie a stratului de beton armat, $m^2.K/W$;

R_{me} - rezistența termică între axa de simetrie a stratului de beton armat și mediul exterior, $m^2.K/W$;

R_{i1} - rezistența termică la fața interioară a peretelui, $m^2.K/W$;

R_{1m} - rezistența termică între fața interioară a peretelui și axa de simetrie a stratului de beton armat, $m^2.K/W$;

U_{im} - transmitanța între mediul interior și axa de simetrie a stratului de beton armat, $W/m^2.K$;

U_{me} - transmitanța între axa de simetrie a stratului de beton armat și mediul exterior, $W/m^2.K$;

U_{i1} - transmitanța la fața interioară a peretelui, $W/m^2.K$;

U_{1m} - transmitanța între fața interioară a peretelui și axa de simetrie a stratului de beton armat, $W/m^2.K$;

C_T - constanta de timp, s, h;

q_{im} - densitatea de flux termic intrat în perete, W/m^2 ;

q_{me} - densitatea de flux termic ieșit din perete, W/m^2 ;

q_{ac} - densitatea de flux termic acumulată în perete, W/m^2 ;

p_s - densitatea de putere termică de regim staționar, W/m^2 ;

Q_{im} - densitatea de energie termică intrată în perete, J/m^2 , kWh/m²;

Q_{me} - densitatea de energie termică ieșită din perete, J/m^2 , kWh/m²;

Q_{ac} - densitatea de energie termică acumulată în perete, J/m^2 , kWh/m²;

Bibliografie

1. Florin Iordache - Termotehnica Construcțiilor, ed. 3-a, editura MatrixRom 2010;

2. Florin Iordache, Florin Baltarețu - Modelarea și simularea proceselor termice, dinamice, editura Conspress, 2005;