

PARAMETRU OPTIMIZĀCIJA ŪDENS SILDĪŠANAS SISTĒMAI AR SAULES ENERĢIJU

Optimization of the Parameters of Solar Water Heating System

U. Iljins, I. Ziemelis, H. Putāns, A. Šķēle, J. Navickas¹

Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Lielā iela 2, Jelgava, LV-3001, Latvija,

Telefons: 371-3005675, e-pasts: fkuldis@cs.llu.lv, faks: 371-3027238

¹Lietuvas Lauksaimniecības universitāte,

Studentu iela 15, Kauņa-Akadēmija, LT-4324, Lietuva

Telefons: 370-69846936, e-pasts: JuozasN@info.lzua.lt

Abstract

In order to investigate the possibility to increase the efficiency of a flat-plate solar collector the mathematical model of the collector has been worked out. By solving the Laplace heat transfer equation at the boundary conditions accordingly to the construction of the collector, the obtained solution gives possibility to simulate on a computer the construction of the collector in dependence on physical, thermal and economic values of materials used for the construction. The computed results by theoretical formulas with experimental results obtained on special laboratory equipment have been compared and good concurrence acquired.

Keywords: *efficiency, solar collector, mathematical model, construction, equipment.*

Ievads

Literatūrā ir atrodami daudzu autoru pētījumu rezultāti un dotās rekomendācijas ūdens sildīšanas sistēmu izveidei izmantojot saules radiāciju. Taču šī informācija bieži ir aptuvena, doto parametru vērtības svārstās plašās robežās, dažreiz tie ir pat pretrunīgi. Tas tāpēc, ka minētās vērtības iegūtas dažādās valstīs, pie vietējiem meteoroloģiskiem apstākļiem, kuri dažādos gada periodos un pa gadiem ir mainīgi. Piemēram, saulaino dienu (stundu) skaits tikai aptuveni raksturo uz zemes virsmas laukumu krītošo saules enerģijas daudzumu, jo saules starojuma plūsmas intensitāti arī saulainā laikā var ievērojami ietekmēt atmosfēras tīrības pakāpe (putekļi, dūmi, ūdens pilieni, dažādu gāzu klātbūtne utt.), kas dažādās pasaules vietās ir dažāda. Ienākot sadzīvē arvien jauniem materiāliem un tehnoloģijām, noveco iepriekšējās pieredzes un eksperimentu dati. Tā saules kolektoru šodien var noslēgt ne vienkārši ar divām vai trim stikla loksnēm, bet ar hermetizētu stikla lokšņu paketi, kas ievērojami izmaina siltumapmaiņu kolektorā. Mūsu darba mērķis bija izveidot saules kolektora matemātisko modeli, kuru varētu izmantot turpmākos pētījumos un projektēšanas vajadzībām.

Metodika

Kolektora darbības modelēšanai un optimālo siltumtehniko, konstruktīvo un ekonomisko parametru noteikšanai, izmantojot matemātiskās fizikas teoriju, tika radīts saules kolektora matemātiskais modelis. Ar tā palīdzību kļuva iespējams pēc zināmiem kolektora konstruktīviem un to veidojošiem siltumtehnikiskiem parametriem aprēķināt temperatūru dažādu kolektora virsmu un materiālu punktos. No otras puses, modeļa pārbaudei tika izveidota datorizēta eksperimentāla iekārta ar 50 termopāriem - sensoriem siltuma sadalījuma mērīšanai pa absorbera (kolektora) virsmu un citās vietās. Sensoru dotie signāli ar multimetra palīdzību tika pārveidoti un ievadīti datora atmiņā kā temperatūru vērtības sensoru nostiprināšanas vietās. Ar matemātisko modeli aprēķinu ceļā iegūtās temperatūras vērtības tika salīdzinātas ar tajos pašos punktos eksperimentāli iegūtam vērtībām.

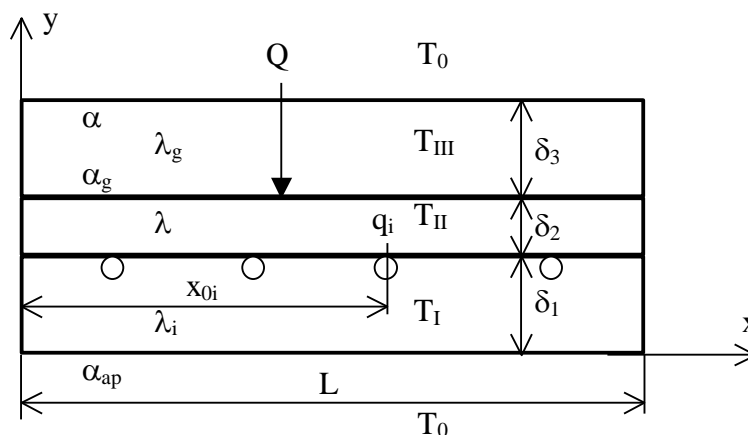
Kolektora matemātiskais modelis

Apskatītā kolektora galvenās sastāvdaļas ir koka, plastmasas vai cita materiāla kaste, kurā ievietots siltuma izolācijas slānis, uz tā absorberis – metāla loksne ar tai apakšpusē piestiprinātu (pielodētu, piemetinātu) izlocītu metāla cauruli, pa kuru plūst siltumnesējs (ūdens) un caurspīdīga materiāla (parasti stikla) vāks. Saskaņā ar reālo konstrukciju, matemātiskais modelis arī satur trīs slāņus (1. att.).

Stacionārā stāvoklī kolektora temperatūras sadalījumu nosaka siltuma vadīšanas vienādojums

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

Lai viennozīmīgi atrisinātu vienādojumu (1), nepieciešams formulēt konkrētā gadījuma robežnosacījumus. Tā kā absorbers kastē no visām pusēm norobežots ar siltuma izolācijas slāni un tā biezums salīdzinot ar virsmas laukumu ir niecīgs (0,8 mm), tad var uzskatīt, ka caur virsmām $x=0$ un $x=L$ siltuma plūsmas nav. Tam atbilstošie robežnosacījumi ir sekojoši



1. att. Aprēķina shēma.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0. \quad (2)$$

Temperatūras sadalījums ir jāaprēķina trīs slāņos, tāpēc katram slānim lietosim atbilstošus temperatūru apzīmējumus - attiecīgi T_I , T_{II} , T_{III} .

Uz paneļa aizmugurējās virsmas, kad $y=0$, notiek konvekcija. Šeit siltuma plūsmu vienādību izsaka nosacījums

$$\lambda_i \left. \frac{\partial T_I}{\partial y} \right|_{y=0} = \alpha_{ap} (T_I|_{y=0} - T_0), \quad (3)$$

kur λ_i – siltuma izolācijas materiāla siltuma vadīšanas koeficients, $W/(m \cdot K)$;

α_{ap} - siltuma atdeves koeficients no paneļa aizmugurējās virsmas, $W/(m^2 \cdot K)$.

Siltuma konvekcija ir arī uz paneļa priekšējās virsmas, kur $y=\delta_1+\delta_2+\delta_3$. Atbilstošais robežnosacījums ir analogs izteiksmei (3)

$$-\lambda_g \frac{\partial T_{III}}{\partial y} \Big|_{y=\delta_1+\delta_2+\delta_3} = \alpha(T_{III}|_{y=\delta_1+\delta_2+\delta_3} - T_0), \quad (4)$$

kur λ_g - gaisa slāņa ekvivalentais siltuma vadīšanas koeficients, $W/(m \cdot K)$;

α - siltuma atdeves koeficients, $W/(m^2 \cdot K)$;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ - siltuma izolācijas, absorbera loksnes un gaisa slāņa starp stiklu un absorberi biezumi, m.

Uz robežas $y=\delta_1$ starp siltuma izolācijas slāni un metāla slāni temperatūras un siltuma plūsmas ir vienādas

$$T_I|_{y=\delta_1} = T_{II}|_{y=\delta_1} \quad (5)$$

un

$$\lambda \frac{\partial T_{II}}{\partial y} \Big|_{y=\delta_1} - \lambda_i \frac{\partial T_I}{\partial y} \Big|_{y=\delta_1} = \sum_{i=1}^n q_i \delta(x - x_{oi}), \quad (6)$$

kur λ - metāla slāņa siltuma vadīšanas koeficients, $W/(m \cdot K)$;

q_i - šķidruma cirkulācijas absorbētā siltuma intensitāte, W/m ;

n - absorbera caurules vijumu skaits;

x_{oi} - absorbera novietošanas koordinātes, m;

$\delta(x-x_{oi})$ - delta funkcija punktveida absorberim, $1/m$.

Uz robežas, kad $y=\delta_1+\delta_2$ arī siltuma plūsmas būs vienādas

$$\lambda \frac{\partial T_{II}}{\partial y} \Big|_{y=\delta_1+\delta_2} + \alpha_g(T_{II} - T_{III})|_{y=\delta_1+\delta_2} = Q, \quad (7)$$

kur α_g - siltuma atdeves koeficients starp absorberi un gaisa slāni, $W/(m^2 \cdot K)$;

Q - absorbētā saules enerģijas jauda, W/m^2 ,

un

$$\alpha_g(T_{II}|_{y=\delta_1+\delta_2} - T_{III}|_{y=\delta_1+\delta_2}) = -\lambda_g \frac{\partial T_{III}}{\partial y} \Big|_{y=\delta_1+\delta_2}. \quad (8)$$

Izveidotā matemātiskās fizikas problēma (1-8) tika atrisināta ar mainīgo atdalīšanas metodi [1]. Temperatūras noteikšanai visu trīs slāņu atsevišķos punktos (ar koordinātēm x un y) iegūtas sekojošas sakarības:

$$T_I(x, y) = T_0 + A^I + B^I y + \sum_k A_k^I (\exp(\mu_k y) + \varphi_k^I \exp(-\mu_k y)) \cos \mu_k x; \quad (9)$$

$$T_{II}(x, y) = T_0 + A^{II} + B^{II}(y - \delta_1) + \sum_k A_k^{II} (\exp(\mu_k (y - \delta_1)) + B_k^{II} \exp(-\mu_k (y - \delta_1))) \cos \mu_k x; \quad (10)$$

$$T_{III}(x, y) = T_0 + A^{III} + B^{III}(y - \delta_1 - \delta_2) + \sum_k B_k^{III} (\varphi_k^{III} \exp(\mu_k(y - \delta_1 - \delta_2)) + \exp(-\mu_k(y - \delta_1 - \delta_2))) \cos \mu_k x, \quad (11)$$

kur koeficientus $A^I, A^{II}, A^{III}, B^I, B^{II}, B^{III}$ nosaka atrisinot lineāru sešu vienādojumu sistēmu (12)

$$\begin{cases} \lambda_i B^I = \alpha_{ap} A^I \\ -\lambda_g B^{III} = \alpha(A^{III} + B^{III} \delta_3) \\ A^I + B^I \delta_1 = A^{II} \\ \lambda B^{II} - \lambda_i B^I = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n q_i \\ \lambda B^{II} + \alpha_g (A^{II} + B^{II} \delta_2 - A^{III}) = Q \\ -\lambda_g B^{III} = \alpha_g (A^{II} + B^{II} \delta_2 - A^{III}) \end{cases} \quad (12)$$

Koeficientu A_k^I nosaka no vienādojuma (13)

$$A_k^I = \frac{e_k (a_k - b_k)}{c_k (b_k - a_k) - a_k (\exp(\mu_k \delta_1) + \varphi_k^I \exp(-\mu_k \delta_1))}, \quad (13)$$

izmantojot sakarības (14-18)

$$\varphi_k^I = \frac{\lambda_i \mu_k / \alpha_{ap} - 1}{\lambda_i \mu_k / \alpha_{ap} + 1}, \quad (14)$$

$$a_k = \exp(\mu_k \delta_2) \left(\left(1 + \frac{\lambda \mu_k}{\alpha_g} \right) \left(1 - \frac{\lambda_g \mu_k}{\alpha_g} \frac{(\varphi^{III} - 1)}{(\varphi^{III} + 1)} \right) - 1 \right), \quad (15)$$

$$b_k = \exp(-\mu_k \delta_2) \left(\left(1 - \frac{\lambda \mu_k}{\alpha_g} \right) \left(1 - \frac{\lambda_g \mu_k}{\alpha_g} \frac{(\varphi^{III} - 1)}{(\varphi^{III} + 1)} \right) - 1 \right), \quad (16)$$

$$c_k = \frac{1}{2} \left(\exp(\mu_k \delta_1) \left(\frac{\lambda_i}{\lambda} - 1 \right) - \varphi_k^I \exp(-\mu_k \delta_1) \left(\frac{\lambda_i}{\lambda} + 1 \right) \right), \quad (17)$$

$$e_k = \frac{1}{\lambda \mu_k L} \sum_{i=1}^n q_i \cos \mu_k x_{0i}; \quad (18)$$

Koeficientus A_k^{II} un B_k^{II} attiecīgi nosaka no izteiksmēm (19, 20)

$$-B_k^{II} - A_k^I \cdot c_k = e_k, \quad (19)$$

$$A_k^{II} = \frac{b_k}{a_k} (e_k + A_k^I \cdot c_k). \quad (20)$$

Koeficientu B_k^{III} nosaka no izteiksmes (21), izmantojot formulu (22)

$$B_{\text{III}_k}^{\text{III}} = \frac{1}{\varphi_{\text{III}_k}^{\text{III}} + 1} \left(A_{\text{II}_k}^{\text{II}} \left(1 + \frac{\lambda \mu_k}{\alpha_g} \right) \exp(\mu_k \delta_2) + B_{\text{II}_k}^{\text{II}} \left(1 - \frac{\lambda \mu_k}{\alpha_g} \right) \exp(-\mu_k \delta_2) \right), \quad (21)$$

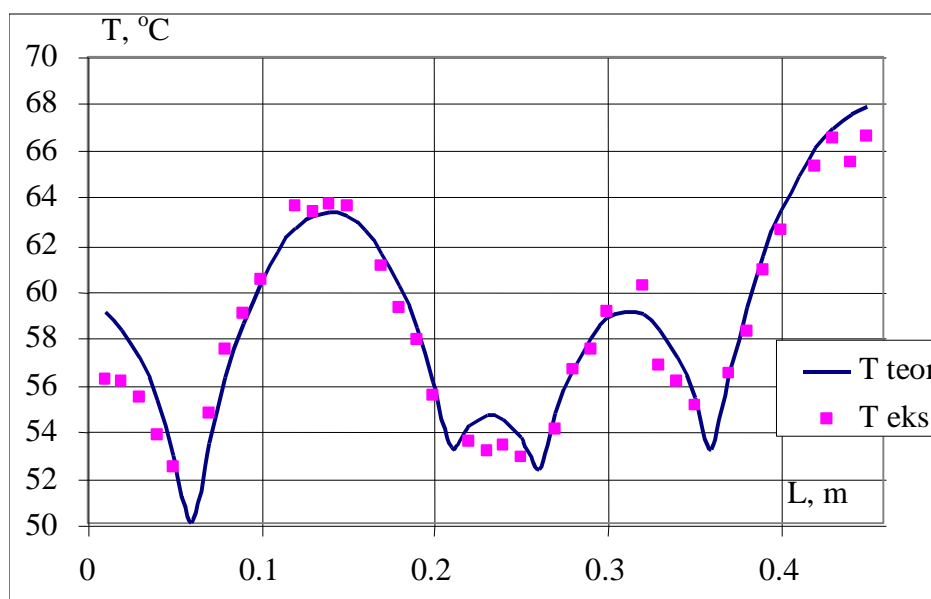
$$\varphi_{\text{III}_k}^{\text{III}} = \frac{\lambda_g \mu_k / \alpha - 1}{\lambda_g \mu_k / \alpha + 1} \exp(-2\mu_k \delta_3). \quad (22)$$

Īpašvērtības μ_k nosaka ar izteiksmi (23)

$$\mu_k = \frac{\pi k}{L}. \quad (23)$$

Teorētiskie aprēķini

Izveidotā matemātiskā modeļa formulas (9) – (23) tika ievadītas datorā atmiņā. Izmantojot eksperimentālās ierīces un izgatavotā eksperimentālā kolektora konstruktīvos parametrus, kā arī zināmos kolektora materiālu siltumtehnikos parametrus, ar iegūtās programmas palīdzību teorētiski tika aprēķināta temperatūra tajos punktos pa absorbera virsmu, uz siltumnesēja caurules un citām virsmām, kuros tā bija noteikta eksperimentāli. Tā kā dažu kolektorā izmantoto materiālu siltumtehniko parametru precīzas vērtības nebija zināmas, tad ievadot datorā eksperimentāli noteikto temperatūru vērtības kļuva iespējams šīs vērtības precizēt.



2.att. Teorētiski aprēķināto un eksperimentāli iegūto temperatūras vērtību salīdzinājums pa absorbera virsmu kolektoram ar 4 caurulēm

Eksperimentālie pētījumi

Izmantojot izveidoto eksperimentālo iekārtu, kolektora darba virsma tika apstarota ar 1000 W jaudas kvēlspuldzi. Kolektora absorberis izveidots no 0,9 mm bieza tērauda skārda ar laukumu 0,188 m², kura priekšpuse nokrāsota ar matētu, melnu silikona krāsu. Absorbera loksnes otrā pusē pielodēta vara caurulīte, ar iekšējo diametru 9 mm. Lai eksperimenta laikā

ētri varētu mainīt attālumu starp atsevišķiem caurulītes taisnajiem posmiem, galos tie lokveidā tika savienoti ar plastmasas caurulītes gabaliem. Ar cirkulācijas sūkņa palīdzību pa caurulīti tika nodrošināta siltumnesēja – ūdens plūsma. Mainot sūkņa apgriezību skaitu bija iespējams mainīt ūdens plūsmas ātrumu caurulē, t.i., absorbera plāksnes dzesēšanas intensitāti. Sildītāja īpatnējā jauda tika iestādīta $600-625 \text{ W/m}^2$, cirkulācijas sūkņa ražība ieturēta – 21 l/h. Temperatūra tika mērīta 40 punktos uz absorbera virsmas, atsevišķos punktos uz siltumnesēja caurules, kā arī uz citām kolektora sastāvdaļu virsmām. Visi rezultāti tika ievadīti un fiksēti datora atmiņā.

Rezultātu salīdzinājums

Izmantojot datorā ievadīto programmu, zināmos kolektora konstruktīvos un kolektoru veidojošo materiālu siltumtehnikos parametrus, tika aprēķinātas temperatūru vērtības tajos pašos punktos, kuros tās tika noteiktas eksperimentāli. Uzzīmētā teorētiski aprēķināto temperatūru līkne un temperatūru eksperimentālās vērtības redzamas 2.attēlā. Rezultātu sakrišanas precizitāti lielā mērā ietekmē matemātiskajā modelī ietilpstošo daudzo koeficientu skaitliskās vērtības, kuras teorētiskajam aprēķinam ņemtas no literatūras. Taču neraugoties uz to, novirzes starp teorētiski aprēķinātām un eksperimentālā ceļā iegūtajām temperatūru vērtībām ir nelielas, kas norāda uz matemātiskā modeļa izmantošanas iespējamību plāksnes tipa absorberu kolektoru projektēšanai un pētīšanai. Eksperimenta laikā tika mainīts absorbera caurulīšu posmu skaits no 2 līdz 4. Katram caurulīšu posmu skaitam tika noteiktas temperatūras vērtības pa absorbera virsmu, uzzīmētas un analizētas to sadalījuma līknes. Kolektora lietderības koeficienta vērtība atradās robežās no 0,44 līdz 0,49.

Visos gadījumos tika iegūta apmēram vienāda teorētiski un eksperimentāli iegūto rezultātu sakrišanas pakāpe.

Secinājumi

1. Izveidoto matemātisko modeli ir iespējams izmantot plakana absorbera kolektoru konstrukciju pētīšanai un projektēšanai;
2. Precīzāku teorētisko rezultātu iegūšanai matemātiskajā modelī nepieciešams ievietot precīzākas kolektora konstrukcijā izmantoto materiālu siltumtehniko parametru vērtības.

Literatūra

1. Riekstiņš E. Matemātiskās fizikas metodes.- R.: Zvaigzne, 1969.- 629 lpp.