ТЕМПЕРАТУРСКИ РЕЖИМ РЕКОНСТРУКЦИЈЕ СОЛАРНОГ АДСОРПЦИОНОГ ХЛАДЊАКА

TEMPERATURE REGIME OF THE SOLAR ADSORPTION COOLER CONSTRUCTION

Проф. др Фарук Белеґу, дипл. инж., Машински факултет, Приштина

Соларни уређаји се могу користити не само за загревање санитарне воде, односно за термичку обраду течних намирница, већ и као соларни хладњак.

У раду се излаже проблематика термичког прорачуна конструкције соларног хладњака. Урађени су и дијаграми, добијени компјутерском техником, који могу корисно послужити за конкретне инжењерске прорачуне.

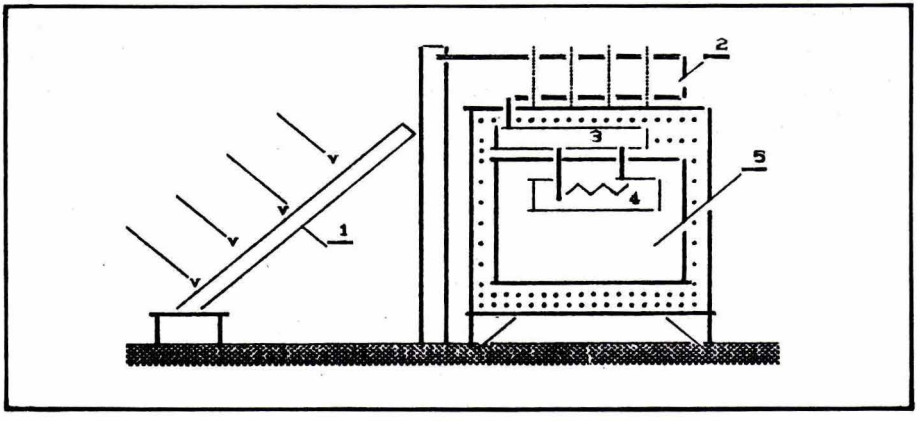
The solar devices are very useful not only for sanitary water heating and liquid food thermal treatment, but also as solar coolers.

The paper deals with the problems of the solar cooler construction thermal calculations. The diagrams for concrete engineering calculations, made with the help of computer technique are added.

Кључне речи: *соларни хладњак; соларни пријемник; расхладни медијум*

Key words: *solar cooler; solar receiver; cooling medium*

У данашње време, соларни уређаји налазе примену не само за добијање топлоте, већ и за производњу хладноће. Карактеристична конструкција адсорпционог соларног хладњака шематски је приказана на сл. 1.



Слика 1. Шема соларног расхладног уређаја; 1 – генератор, 2 – кондензатор, 3 – пријемник, 4 – испаривач, 5 – расхладна комора

У генератор хладњака уграђене су цеви, испуњене апсорбентом и расхладним агенсом, а као расхладни медијум се обично користи амонијак. При загревању генератора под дејством сунчеве радијације из апсорбента се издваја пара амонијака, која се затим води у кондензатор и ту настаје кондензација расхладног агенса на рачун терморазмене са ваздухом. Течни амонијак сакупља се у пријемнику и испуњава испаривач хладњака. При снижењу температуре генератора после заласка сунца апсорбент почиње активно да апсорбује пару амонијака, што доводи до снижења притиска у пријемнику и до кључања течног амонијака у испаривачу хладњака.

Процес кључања је праћен одузимањем топлоте из расхладне коморе и на тај начин се постиже ефекат хлађења. Процес рада хладњака се периодично понавља, при чему се периодично мења и температурски режим конструкције соларног хладњака.

При разради конструкције соларног хладњака неопходно је прорачунати температурски режим хелиоуређаја, у смислу обезбеђења траженог расхладног капацитета и довољно ниских температура унутар коморе хладњака.

Методологија одређивања температурског режима конструкције соларног хладњака заснива се на прорачуну температурског режима конструкције и условима периодичног топлотног узајамног деловања.

Параметри радног циклуса соларног расхладног уређаја и његов расхладни капацитет у великој мери зависе од температурског режима генертора, а то је у реципрочној зависности од температуре спољњег ваздуха и од интензитета сумарне сунчеве радијације у односу на активно деловање на површину генертора. Због континуалне промене релевантних параметара, температурски режим генератора у суштини је нестационаран.

За опис температурског режима генератора у условима периодичне промене параметара, третираћемо једначине топлотног биланса:

$$A_c I T_{su} - K_s\left(t_c - t_{vs}\right) - a_{iu}\left(t_c - t_{iu}\right)\cdot\left(F_i / F_s\right) = \frac{m_c c_c}{F_c}\cdot\frac{dt_c}{d_\tau} \qquad (1)$$

– за генератор:

$$A_{ss} I + \alpha_m\left(t_{ss} - t_{su}\right) - \alpha_{ss}\left(t_{ss} - t_{vs}\right) = \rho_s c_s \delta_{ss}\cdot\frac{dt_{ss}}{d_\tau} \qquad (2)$$

– за спољње стакло прозрачног прекривача:

$$A_{su} I T_{ss} - \alpha_m\left(t_{su} - t_{ss}\right) + \alpha_{su}\left(t_c - t_{su}\right) = \rho_s c_s \delta_{su}\cdot\frac{dt_{su}}{d_\tau} \qquad (3)$$

– за унутрашње стакло прозрачног прекривача:

где су A_c, A_{ss} и A_{su} – апсорпционе способности цеви генератора спољњег и унутрашњег стакла; T_{ss} и T_{su} – пропусне способности спољњег и унутрашњег стакла; t_{vs} и t_c – температуре спољњег ваздуха и цеви генератора; t_{ss} и t_{su} – температуре спољњег и унутрашњег стакла; t_{iu} и t_{is} –температуре на унутрашњој и спољњој површини изолације генертора;

$$K_s = \frac{1}{1/\alpha_{ss} + (\delta_{ss} + \delta_{su})/\lambda_s + \delta_m/\lambda_{ekv} + 1/\alpha_{su}} \tag{4}$$

Коефицијент терморазмене стаклене ограде; α_{su} и α_{ss} – коефицијенти конвекције на унутрашњој и спољњој површини стаклене ограде; α_m – коефицијент конвекције унутар ваздушног међупростора стаклене ограде; δ_m – дебљина ваздушног простора између стакала; λ_s – коефицијент термопроводљивости стакла; λ_{ekv} – еквивалентни коефицијент термопроводљивости ваздушног међуслоја; m_c – сумарна маса цеви генератора и адсорбента; c_c – средњи термички капацитет цеви и адсорбента; F_i и F_s – унутрашња површина изолације и стаклене ограде; I – интензитет сунчеве радијације; τ – време.

При састављању система једначина (1–4) претпостављало се да је термокапацитет ваздуха у међупростору генератора мали у односу на термокапацитет цеви генератора и да је терморазмена кроз стаклену ограду генератора узета за стационарни режим, пошто су термички капацитет стакла и ваздушног међуслоја мале величине.

Расподела температура унутар изолационог оклопа генератора може се изразити односом:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \tau} = a_i \cdot \frac{\partial^2 t_i}{\partial I^2} \tag{5}$$

у граничним условима за I = 0:

$$-\lambda_i \cdot \left(\frac{\partial t_i}{\partial I}\right)_{I=0} = \alpha_{iu} \cdot (t_c - t_i) \tag{6}$$

односно при $I = \delta_i$:

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial t_i}{\partial I}\right)_{I=\delta_i} = \alpha_{is} \cdot (t_i - t_{vs}) \tag{7}$$

где су: λ_i и a_i – коефицијенти термопроводљивости и температурске проводљивости изолације; δ_i – дебљина изолације; I – координата у правцу од унутрашње ка спољњој површини изолације.

Пошто дневна промена параметара спољне терморазмене има периодични карактер, решење једначина (1–7) потражићемо у облику Фуријеових редова:

$$t_c = t_{co} + \sum_{k=1}^{\infty}\left(x_k \cos k\frac{2\pi\tau}{z} + y_k \sin k\frac{2\pi\tau}{z}\right) \tag{8}$$

$$t_{ss} = t_{sso} + \sum_{k=1}^{\infty}\left(g_k \cos k\frac{2\pi\tau}{z} + f_k \sin k\frac{2\pi\tau}{z}\right) \tag{9}$$

$$t_{su} = t_{suo} + \sum_{k=1}^{\infty}\left(u_k \cos k\frac{2\pi\tau}{z} + v_k \sin k\frac{2\pi\tau}{z}\right) \tag{10}$$

$$t_i = t_{io}(I) + \sum_{k=1}^{\infty}\left(m_k(I)\cos k\frac{2\pi\tau}{z} + n_k(I)\sin k\frac{2\pi\tau}{z}\right) \tag{11}$$

где су t_{co}, t_{sso}, t_{suo}, $t_{io}(I)$ – средње вредности релевантних температура; x_k, y_k, g_k, f_k, u_k, v_k, m_k, n_k – коефицијенти редова; z – период колебања; к = 1, 2, 3, ..., целобројне променљиве.

Вредности средњих температура и коефицијената редова (8–11) треба одредити и у склопу решавања, а у смислу упрошћавања проблематике Фуријеове редове можемо приказати и преко комплексне променљиве:

$$t_c = t_{co} + \sum_{k=1}^{\infty}\theta_{ck}\cdot\exp\left(k\frac{2\pi\tau}{z}i\right) \tag{12}$$

$$t_{ss} = t_{sso} + \sum_{k=1}^{\infty}\theta_{ssk}\cdot\exp\left(k\frac{2\pi\tau}{z}i\right) \tag{13}$$

$$t_{su} = t_{suo} + \sum_{k=1}^{\infty}\theta_{suk}\cdot\exp\left(k\frac{2\pi\tau}{z}i\right) \tag{14}$$

$$t_i = t_{io}(I) + \sum_{k=1}^{\infty}\theta_{ik}(I)\cdot\exp\left(k\frac{2\pi\tau}{z}i\right) \tag{15}$$

где су: θ_{ck}, θ_{ssk}, θ_{suk}, θ_{ik} (I) – амплитудно-фазне карактеристике простих хармоничних саставних температура, које су са коефицијентима редова (8–11) повезане односима:

$$\theta_{ck} = x_k - i\cdot y_k \tag{16}$$

$$\theta_{ssk} = g_k - i\cdot f_k \tag{17}$$

$$\theta_{suk} = u_k - i\cdot v_k \tag{18}$$

$$\theta_i(I) = m_k(I) - i\cdot n_k(I) \tag{19}$$

Према наведеној аналогији могу се дати и следећи односи:

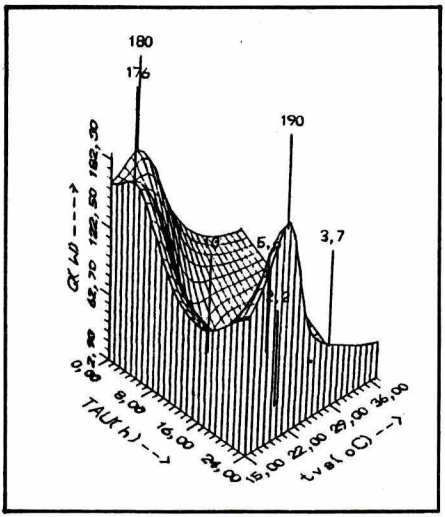
$$t_{vs} = t_{vso} + \sum_{k=1}^{\infty}\theta_{vsk}(I)\cdot\exp\left(k\frac{2\pi\tau}{z}i\right) \tag{20}$$

$$I = I_o + \sum_{k=1}^{\infty}\theta_{Ik}\cdot\exp\left(k\frac{2\pi\tau}{z}i\right) \tag{21}$$

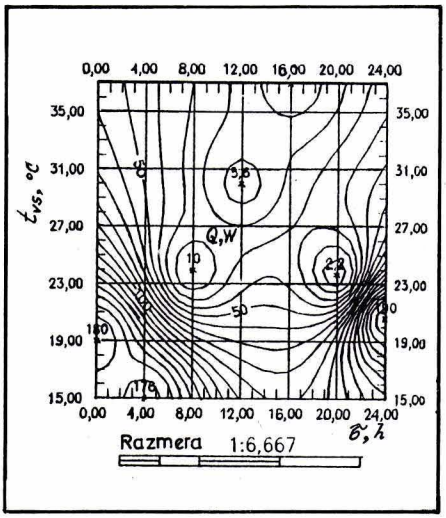
где је:

$$\theta_{vsk} = a_k - i\cdot b_k \tag{22}$$

$$\theta_{IK} = c_k - i\cdot d_k \tag{23}$$



Слика 2.



Слика 3.

Овде су t_{vso} и I_o средње вредности температура спољњег ваздуха и интензитета сунчеве радијације; a_k, b_k, c_k, d_k, – коефицијенти Фуријеових редова, који се одређују при хармоничној анализи дневних колебања температура спољњег ваздуха и интензитета сунчеве радијације.

Решење система једначина (1–7) започињемо са једначином термопроводљивости за изолацију оклопа генератора, при чему се мора узети у обзир и (11). После извесних трансформација, диференцијална једначина термопроводљивости своди се на облике:

$$\frac{d^2 t_{io}(I)}{dI^2} = 0 \tag{24}$$

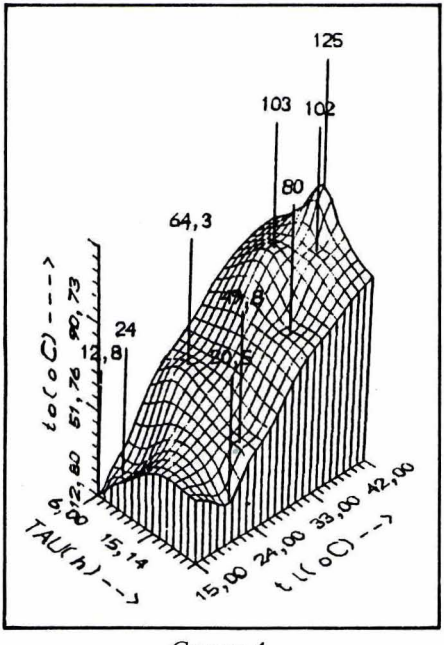
$$\frac{d^2 \theta_{ik}(I)}{dI^2} - k \cdot \frac{2\pi i}{za} \cdot \theta_{ik}(I) = 0 \tag{25}$$

Једначина (24) описује расподелу средњих температура по дебљини изолације, док једначина (25) – расподелу к-тих амплитудно-фазних карактеристика температура по дебљини зида.

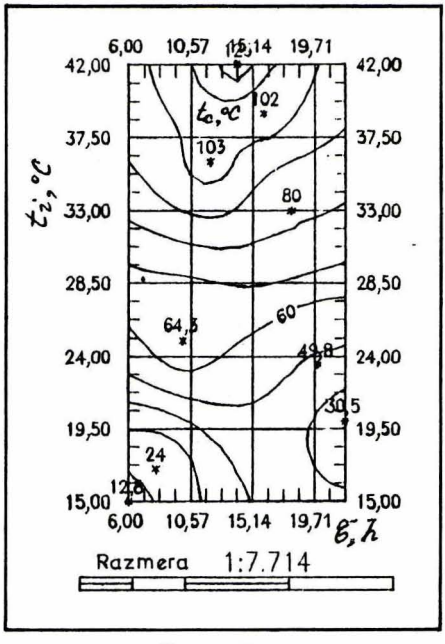
Решавајући систем једначина (24–25) можемо одредити и зависности за средње температуре и амплитудно-фазне карактеристике хармоничних саставних температура на унутрашњој и спољњој површини изолације:

$$t_{iuo} = t_{co} + \frac{K_i}{\alpha_{iu}} \cdot \left(t_{vso} - t_{co}\right) \tag{26}$$

$$t_{iso} = t_{co} + K_i \left(t_{vso} - t_{co}\right)\left(\delta_i / \lambda_i + 1/\alpha_{iu}\right) \tag{27}$$



Слика 4.



Слика 5.

$$\theta_{iuk} = \frac{\theta_{ik} + \left(Bi_{iu} / Bi_{is}\right) \cdot \varepsilon_{ki} \cdot \theta_{ck}}{\mu_{kx}} \tag{28}$$

$$\theta_{isk} = \frac{\theta_{ck} \cdot \left(Bi_{iu} / Bi_{is}\right) + \theta_{sk} \cdot \xi_{ki}}{\mu_{ki}} \tag{29}$$

где су ε_{ki}, μ_{ki}, ξ_{ki} коефицијенти који одређују конструкцију изолације хладњака.

Поставивши у једначине (2) и (3) односе (12), (14), (20) и (21), после извесних трансформација добијамо:

$$t_{s20} = \frac{(\alpha_m + \alpha_{ss})\, A_s T_{ss} I_o + \alpha_m A_s I_o + \alpha_{ss}\alpha_m t_{vso} + \alpha_{su}\left(\alpha_m + \alpha_{ss}\right) t_{co}}{\alpha_m \alpha_{ss} + \alpha_{su}\alpha_m + \alpha_{su}\alpha_{ss}} \tag{30}$$

$$t_{s10} = \frac{A_{ss} I_o + \alpha_m t_{suo} + \alpha_{ss} t_{vso}}{\alpha_m + \alpha_{ss}} \tag{31}$$

$$\theta_{su} = \left(A_{su} T_{ss} + A_{ss} / S_k\right) \theta_{Ik} + \alpha_{ss}\theta_{sk} / S_k + \alpha_{ss}\theta_{ck} \tag{32}$$

$$\theta_{ss} = \frac{A_{ss}\theta_{sk} + \alpha_m\theta_{suk} + \alpha_{ss}\theta_{sk}}{\alpha_m + \alpha_{ss} + \rho_s c_s \delta_{ss} k \cdot (2\pi\tau / z)} \tag{33}$$

где је:

$$S_k = 1 + \frac{\alpha_{ss}}{\alpha_m} + \rho_s \frac{c_s \delta_{ss}}{\alpha_m} k \frac{2\pi}{z} \tag{34}$$

Решење једначине (1), после постављања односа (13), (20), (21), и после извесних трансформација, може се добити и у облику:

$$t_{co} = t_{vso} + \frac{A_c T_{su} I_o}{K_s + k_i \cdot (F_i / F_s)} \tag{35}$$

$$\theta_{ck} = \frac{A_c T_{su}\theta_{Ik} + \left[K_s + (\alpha_{iu} / \mu_{ki}) \cdot \right.}{K_s + \alpha_i \cdot (F_i / F_s) \cdot \left[1 - (Bi_{iu}\varepsilon_k) / \right.} \frac{\cdot (F_i / F_s)\Big]\theta_{sk}}{/ (Bi_{is}\mu_k)\Big] + (m_c c_c / F_s) \cdot (2\pi ki / z)} \tag{36}$$

Прорачун средњих вредности и температура и амплитудно-фазних карактеристика према добијеним зависностима своди се на алгебарске прорачуне над реалним и комплексним бројевима. У том смислу можемо одредити: t_{co} и θ_{ck} – према односима (35) и (36); t_{suo}, t_{sso}, θ_{su}, θ_{ss} – према релацијама (30–34); t_{iuo}, θ_{ik} – према односима (26–29). Према релацијама (16–19) помоћу амплитудно-фазних карактеристика можемо одредити коефицијенте Фуријеових редова (8–11):

$$x_k = re(\theta_{ck}); \qquad y_k = -\mathrm{Im}(\theta_{ck}) \tag{37}$$

$$g_k = \mathrm{Re}(\theta_{ssk}); \qquad f_k = -\mathrm{Im}(\theta_{ssk}) \tag{38}$$

$$u_k = \mathrm{Re}(\theta_{suk}); \qquad v_k = -\mathrm{Im}(\theta_{suk}) \tag{39}$$

$$m_i(0) = \mathrm{Re}(\theta_{iuk}); \quad n_k(0) = -\mathrm{Im}(\theta_{iuk}) \tag{40}$$

$$m_{ik}(\delta_i) = \mathrm{Re}(\theta_{isk}); \quad n_k(\delta) = -\mathrm{Im}(\theta_{isk}) \tag{41}$$

где је $\mathrm{Re}(\theta)$ реални део амплитудно-фазне карактеристике, а $\mathrm{Im}(\theta)$ – имагинарни део поменуте величине.

У вези са анализом рада соларног хладњака, осим температура генератора потребно је знати и законитост одвођења топлоте из расхладне коморе при нестационарном режиму терморазмене, када се расхладни капацитет уређаја и температура ваздуха периодички мењају током времена.

Повећање температуре генератора услед сунчане радијације (8), доводи до издвајања пара расхладног агенса из адсорбента и до повишења притиска унутар уређаја, који се начелно може одредити према:

$$P = \frac{\rho}{\mu} R T_c \tag{42}$$

где су: P – притисак, ρ – густина пара расхладног медијума, R – универзална гасна константа, T_c – апсолутна температура цеви генератора а μ – молекулска маса расхладног агенса.

Густина пара расхладног агенса зависи од параметара при преносу масе, од процеса десорпције и адсорпције у генератору, и у крајњој линији јавља се као функција температуре генератора. У интервалу температура од 20 до 120°C према експерименталним мерењима утврђена је критеријална зависност:

$$\rho = 0{,}005 \cdot t_c^{1,6} \ \left(kg/m^3\right) \tag{43}$$

Према релацијама (42), (43) и (8) можемо одредити промену притиска у хидрауличној магистрали соларног хладњака.

За одређивање расхладног капацитета соларног хладњака можемо користити и једначину топлотног биланса његовог кондензатора:

$$K_K F_K \theta_m(\tau)\, d\tau = \left[c_p\left(t_c - t_K\right) + r\right] dG \tag{44}$$

где су: K_K и F_K – коефицијенти терморазмене и површина кондензатора; c_p и r – специфични термички капацитет и специфична топлота фазне трансформације расхладног агенса; dG – маса која се кондензује за време dτ; θm(τ) – средњи температурски напор у кондензатору:

$$\theta_m(\tau) = \left[t_c(\tau) - t_K(\tau)\right] / \ln\left[\frac{t_c(\tau) - t_{vs}(\tau)}{t_K(\tau) - t_{vs}(\tau)}\right] \tag{45}$$

где је $t_{vs}(\tau)$ – температура ваздуха који хлади (опструјава) кондензатор.

Према (44), одређује се зависност за масу расхладног агенса, која прелази у течно стање у кондензатору и скупља се у пријемнику хладњака за временски интервал од τ_1 до τ_2, при чему је температура $t_c(\tau)$ већа од температуре $t_{vs}(\tau)$:

$$G = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{K_K F_K \theta_m(\tau)}{c_p\left[t_c(\tau) - t_K(\tau)\right] + r}\, d\tau \tag{46}$$

Кондензација расхладног агенса у времену од τ_1 до τ_2 је могућа због одвођења топлоте ваздухом који опструјава кондензатор.

У вечерњим и ноћним часовима дана, када температура генератора опадне, течни расхладни медијум почиње интензивно да испарава и тако му опадне температура, снижавајући температуре пријемника и испаривача, одводећи топлоту из расхладне коморе.

За временски интервал од τ_2 до τ_3 (испаравања расхладног агенса) може се дати једначина топлотног биланса:

$$\left(G - G_o\right) r = \int_{\tau_2}^{\tau_3} K_I F_I \left(t_{vk} - t_K\right) d\tau + \int_{\tau_2}^{\tau_3} K_R F_R \left(t_{vs} - t_K\right) d\tau \tag{47}$$

где је G_o маса расхладног агенса, при чијем испаравању се снизи температура пријемника, испаривача и расхладног медијума од $t(\tau_2)$ до $t(\tau_3)$:

$$G = \frac{\left(c_T G + c_R m_R + c_I m_I\right)\left[t\left(\tau_2\right) - t\left(\tau_3\right)\right]}{r + c_T\left[t\left(\tau_2\right) - t\left(\tau_3\right)\right]} \tag{48}$$

где су: c_T, c_R, c_I – специфични термички капацитети течног расхладног медијума, пријемника и испаривача; m_R и m_I – масе пријемника и испаривача; K_I, F_I – коефицијенат терморазмене и површина испаривача; K_R и F_R – коефицијенат терморазмене и површина пријемника; t_{vk} – температура ваздуха унутар расхладне коморе.

Први члан у (47) карактерише количину топлоте која се одводи из расхладне коморе за један радни циклус. Користећи средњу вредност Q_o расхладног капацитета уређаја, можемо написати:

$$Q_o \cdot z = \int_{\tau_2}^{\tau_3} K_I F_I \left(t_{vk} - t_K\right) \cdot d\tau \tag{49}$$

$$Q_o = K_K F_K \left(t_{vso} - t_{vko}\right) \tag{50}$$

где су: z – време трајања циклуса једнака 24 часа; K_K и Φ_K – коефицијенат терморазмене и површине расхладне коморе; t_{vso} и t_{vko} – средње температуре спољњег ваздуха унутар расхладне коморе.

Експериментална истраживања соларних колектора су показала да је амплитуда колебања температуре ваздуха у расхладној комори мала величина (3–5°C), те се однос (49) може написати у облику:

$$Q_o \cdot z = \int_{\tau_2}^{\tau_3} K_I F_I \left(t_{vko} - t_K\right) \cdot d\tau \tag{51}$$

Према (51) и (50) можемо одредити средњу температуру ваздуха у расхладној комори:

$$t_{vko} = \frac{z K_K t_{vso} + \int_{\tau_2}^{\tau_3} K_I F_I t_K d\tau}{z K_K F_K + K_I F_I \left(\tau_3 - \tau_2\right)} \tag{52}$$

Приближну вредност расхладног капацитета можемо одредити према:

$$Q = K_I F_I \left(t_{su} - t_K\right) \tag{53}$$

Расхладни капацитет и средња температура у комори хладњака одређују се према зависностима (46–53) помоћу ERM, користећи нумеричке методе интеграљења. Одвођење топлоте из расхладне коморе (6–8 часова) чини 25–33% од дужине трајања радног циклуса хладњака. Због тога је температурски режим рада коморе соларног хладњака нестационаран.

На сликама 2 и 3 приказана је функционална зависност $t_c = f_1(\tau,ti)$, а на сликама 4 и 5 функционална зависност $Q = f_2(\tau,t_{vs})$, и то у виду аксонометријског и топографског дијаграма. Ти дијаграми могу корисно да послуже за конкретне инжењерске прорачуне.

Литература

[1] **Мартиновски, В. С.:** *Холодилније машини.* Пишћепромиздат, Москва, 1950.

[2] **Розенфелд, Л. М., Ткачев, А. Г.**: *Холодилније машини и аппарати*, Госторгиздат, Москва, 1960.

[3] **Планк, Р.**: *Handbuch der Kältetechnik*, Springer-Verlag, Bd. 1–11, Берлин, 1952–1967.

[4] **Душин, И. Ф.**: *Изолационние конструкции холодилников*, Госторгиздат, Москва, 1958.

[5] * * *: *ASHRAE Fundamentals,* Атланта, У.С.А. 1977.

[6] **Белегу, Ф.**: *Техника хлађења*, Приштина, 1987.