

Biblid: 0350-2953 (2011)37, 4: 409-418
UDK: 52-335.7:551.571:631.15

Originalni naučni rad
Original scientific paper

**MATEMATIČKI MODEL TEMPERATURNOG POLJA SKLADIŠTA ZA
POVRĆE I VOĆE BEZ STRUJANJA VAZDUHA
MATHEMATICAL MODEL OF TEMPERATURE FIELD OF STORAGE FOR
VEGETABLES AND FRUITS WITHOUT AIR FLOW**

Vojislav Simonović, Marko Dragić, Žarko Čebela, Dragan Krstić, Ivana Marković¹
¹Mašinski fakultet, Beograd, Kraljice Marije 16
vsimonovic@mas.bg.ac.rs

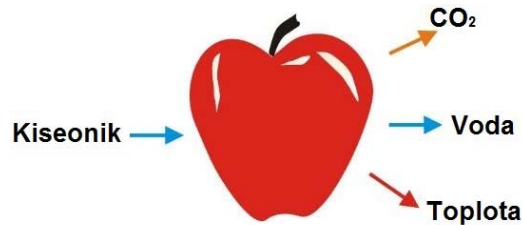
SAŽETAK

U ovom radu modeliran je uticaj toplote koje povrće i voće odaje tokom procesa skladištenja kao produkt respiracije uz CO₂ i vodu. Za potrebe modeliranja, celo skladište izdeljeno je na N³ paralelopipeda i usvojene su početne pretpostavke. Vazduh miruje u graničnim slojevima, specifična toplota vazduha jednaka je u svim tačkama skladišta, u paralelopipedu V postoji tačka C u kojoj temperatura $\theta_C(t)$ i gustina $\rho_C(t)$ imaju srednje vrednosti $\theta_{sr}(t)$ i $\rho_{sr}(t)$, koeficijent provođenja toplote između dve susedne ćelije je konstantan i nezavistan od položaja tih ćelija, srednja gustina vazduha u ćeliji je i ona je konstantna za celu ćeliju. Upravljački toplotni izvori ili ponori potiču od nekog električnog ili termičkog grejnog odnosno rashladnog tela, dok poremećajni toplotni izvori potiču od uskladištenog povrća i voća. Njihov intezitet je određen položajem upravljačkog organa odnosno količinom, stanjem i vremenom skladištenja biomaterijala. Na kraju rada je prikazana približna jednačina temperaturnog polja skladišta sa čistim vremenskim kašnjenjem koje se javlja usled vremena potrebnog za prenos signala sa jednog mesta na drugo, kao i dijagram odskočnog odziva temperature.

Key words: skladište, povrće i voće, matematički model.

1. UVOD

Nakon branja voće i povrće postepeno gubi svoju prirodnu sposobnost odbrane od mikroorganizama. U plodovima i drugim jestivim delovima se nastavljaju fiziološke aktivnosti koje su praćene određenim biohemijskim reakcijama, a koje mogu izazvati ili ubrzati kvarenje. Oksidaciju organskih materija u svežem voću i povrću prati izdvajanje ugljen-dioksida, vode i toplote (slika 1). Prema tome, kvarenje svežeg voća i povrća tokom transporta i skladištenja, odnosno od branja do finalnog odredišta je između ostalog posledica respiracije (Đević i dr, 2005). Najčešći načini za usporavanje ovih procesu su: hlađenje i smanjenje koncentracije kiseonika u okolini. Hlađenje proizvoda, između ostalog ima cilj smanjenje brzine respiracije. Zavisno od uslova pod kojima se skladišti voće ili povrće u hladnjačama, gubitak se može svesti na najmanju meru. Zato je poznavanje procesa respiracije kao i analiza toplotnog uticaja uskladištenog materijala od velikog značenja u vođenju procesa čuvanja voća i povrća. Fiziološki proces se odvija i tokom vegetacije biljke, ali u puno manjoj meri nego u plodovima nakon branja (Kos i dr, 2003).



Sl. 1. Respiracija voća
Fig. 1. Respiration of fruits

U vazdušno-zaptivenom ili hermeticki zatvorenom skladištu insekti će biti ubijeni ako koncentracija kiseonika opadne na 2 % (Brkić i dr, 2003). Toplota koju odaje povrće i voće mora se uzeti u obzir prilikom temperaturnog modeliranja i proračuna, zajedno sa ostalim činiocima temperaturne regulacije skladišta. Značaj pravilnog modeliranja je veliki doprinos povećanju perioda čuvanja biomaterijala poput povrća i voća u skladištima i naročito očuvanju njihovog kvaliteta.

2. MATERIJAL I METOD

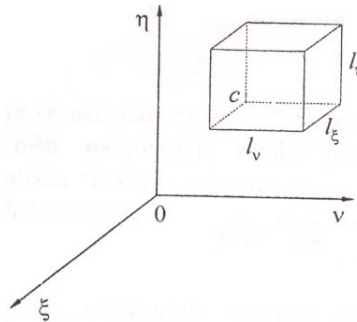
Vazдушnom polju vazduha mogu se pridružiti razni modeli, zavisno od njegovih karakteristika, ciljeva proučavanja, tražene i zahtevane jednostavnosti matematičkog modela. Skladište predstavlja prostor konstantne zapremine, ograničen krutim delovima: zidom, podovima, tavanicom, prozorima i vratima. U tom prostoru je vazduh koji predstavlja viskoznan, stišljiv gas određenog sastava, koji pored toga može biti i vlažan (Kostić i dr, 2009).

Između vazduha u prostoriji i njene granice, kao i uskladištenog povrća i voća ostvaruje se razmena toplote. Skladište može biti i ozračeno pa se toplota prenosi zračenjem. U prostoriji se mogu nalaziti i izvori toplote, kao što su peći i drugi grejači, dovodi toplog vazduha, dovod vazduha kroz vrata i prozore itd. Ponori toplote mogu biti: dovodi hladnog vazduha, hladna tela i odvodi vazduha, što je kog skladišta češći slučaj. Izvori i ponori neravnomerno su raspoređeno po skladištu. Temperaturno polje granica skladišta nije homogeno, što povlači nehomogenost temperaturnog i strujnog polja u samoj prostoriji. Spoljni uticaji (temperatura granice skladišta, intezitet ozračenosti skladišta, strujanje vazduha kroz vrata i prozore) i posebno zračenje toplote od uskladištenog povrća i voća su slučajnog karaktera. Zato su strujanja i temperaturne promene slučajnog karakteta (Kosi i dr, 2005).

Matematički model temperaturnog polja vazduha u skladištu određen je sa nekoliko pretpostavki.

Vazduh u prostoriji miruje sem u graničnim slojevima. Čim temperaturno polje nije homogeno razlika temperatura u pojedinim tačkama dovodi do razlika gustina odnosno pritisaka u pojedinim tačkama usled čega dolazi do strujanja. U slučaju da su količine vazduha koje se prenose relativno male može se usvojiti ova pretpostavka. Kao posledica, prostiranje toplote kroz vazduh u skladištu ostvaruje se provođenjem i zračenjem ali ne i

konvekcijom (Patierno, 2008). Vazduh u skladištu je aproksimiran paralelepipedom dimenzija l_ξ, l_ν, l_η , u pravcu kordinatnih osa O_ξ, O_ν, O_η , slika 2.



Sl. 2. Deo vazduha u skladištu
Fig. 2. Part of air in storage

Njegova zapremina je $V = l_\xi l_\nu l_\eta$. Toplota akumulisana u paralelepipedu u trenutju t iznosi:

$$\bar{Q}_V(t) = \iiint_V c(t, \xi, \nu, \eta) \rho(t, \xi, \nu, \eta) \theta(t, \xi, \nu, \eta) d\xi d\nu d\eta \quad (1)$$

Nova pretpostavka je da je specifična toplota vazduha jednaka je u svim tačkama skladišta

Na osnovu ove pretpostavke je:

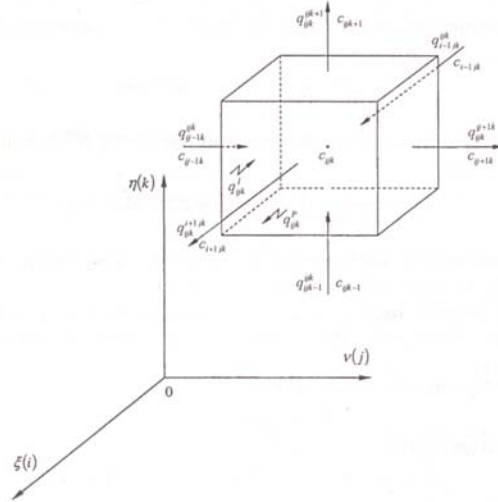
$$\bar{Q}_V(t) = c_n(t) \iiint_V \rho(t, \xi, \nu, \eta) \theta(t, \xi, \nu, \eta) d\xi d\nu d\eta \quad (2)$$

Masa vazduha $m_\nu(t)$ u paralelepipedu zapremine V u trenutku t iznosi:

$$m_\nu(t) = \iiint_V \rho(t, \xi, \nu, \eta) d\xi d\nu d\eta \quad (3)$$

Sledeća pretpostavka je da u paralelepipedu V postoji tačka C u kojoj temperatura $\theta_C(t)$ i gustina $\rho_C(t)$ imaju srednje vrednosti $\theta_{sr}(t)$ i $\rho_{sr}(t)$. Celo skladište izdeljeno je na N^3 paralelopipeda pri čemu je svaka dužina prostorije izdeljena na N jednakih dužina l_ξ, l_ν, l_η u pravcu glavnih koordinatnih osa. Položaj svake ćelije određen je sa i, j, k ($i \rightarrow \xi, j \rightarrow \nu, k \rightarrow \eta$). Sve ćelije kod kojih je: $i = 1$ ili $i = N$, $j = 1$ ili $j = N$, $k = 1$ ili $k = N$, odnosno: $\min(i, j, k) = 1$ ili $\max(i, j, k) = N$ su granične ćelije. Ostale ćelije kod kojih je: $\min(i, j, k) \geq 2$ i $\max(i, j, k) \leq N-1$ su unutrašnje ćelije.

Zapremina ćelije označena je sa V_{ijk} . Njena srednja temperatura je θ_{ijk} i ona vlada u tački C_{ijk} . Radi jednostavnosti usvaja se sledeća pretpostavka čija tačnost raste sa povećanjem broja N . Tačka C_{ijk} ćelije (i, j, k) je u njenom sedištu. Srednja gustina vazduha u ćeliji je ρ_{ijk} i ona je konstantna za celu ćeliju. Pretpostavka je da je koeficijent provođenja toplote između dve susedne ćelije konstantan i nezavistan od položaja tih ćelija (Petrović i dr, 2009). Takođe, koeficijent prelaza toplote sa granice prostorije na vazduh u njoj (ili obratno) je konstantan i nezavisan od položaja granične ćelije. Temperaturu tačke sa granice prostorije označavaćemo sa θ^s . Na slici 3 prikazana je elementarna ćelija.



Sl. 3 Elementarna ćelija
Fig. 3 A one cell of air in storage

Sa q je označen toplotni protok po jedinici površine. Pri tome donji indeksi označavanju ćeliju iz koje dolazi toplota, a gornji indeks ćeliju u koju ta toplota stiže. Sa q_{ijk}^I i q_{ijk}^P su označeni toplotni protoci po jedinici zapremine izvora i ponora koji se nalazi u (i, j, k) ćeliji.

Oni se sastoje iz dva dela: upravljačkog: q_{ijk}^{Iu} i q_{ijk}^{Pu} i poremećajnog: q_{ijk}^{Iz} i q_{ijk}^{Pz} , tj.:

$$\begin{aligned} q_{ijk}^I &= q_{ijk}^{Iu} + q_{ijk}^{Iz} \\ q_{ijk}^P &= q_{ijk}^{Pu} + q_{ijk}^{Pz} \end{aligned} \quad (4)$$

U jednoj ćeliji mogu se naći svi ovi toplotni protoci po jedinici zapremine. Upravljački toplotni izvori ili ponori potiču od nekog električnog ili termičkog grejača ili od nekog

grejnog odnosno rashladnog tela. Njihov intezitet je određen položajem upravljačkog organa.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu Furijeovog empirijskog zakona o prostiranju toplote provođenjem i na osnovu Njutnovog zakona o prostiranju toplote prelazom sa zida na fluid koji struji pored njega i na osnovu prve posledice su:

$$q_{i-1,jk}^{ijk} = \begin{cases} \lambda_{\xi}^{-1}(\theta_{i-1,jk} - \theta_{ijk}) & 1 < i \leq N \\ K(\theta_{i-1,jk} - \theta_{ijk}) & i = 1 \end{cases} \quad \forall j, k = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

$$q_{ijk}^{i+1,jk} = \begin{cases} \lambda_{\xi}^{-1}(\theta_{ijk} - \theta_{i+1,jk}) & 1 \leq i < N \\ K(\theta_{ijk} - \theta_{i+1,jk}) & i = N \end{cases} \quad \forall j, k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$q_{ij-1k}^{ijk} = \begin{cases} \lambda_{\nu}^{-1}(\theta_{ij-1k} - \theta_{ijk}) & 1 < j \leq N \\ K(\theta_{ij-1k} - \theta_{ijk}) & j = 1 \end{cases} \quad \forall i, k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$q_{ijk}^{ij+1k} = \begin{cases} \lambda_{\nu}^{-1}(\theta_{ijk} - \theta_{ij+1k}) & 1 \leq j < N \\ K(\theta_{ijk} - \theta_{ij+1k}) & j = N \end{cases} \quad \forall i, k = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$$q_{ijk-1}^{ijk} = \begin{cases} \lambda_{\eta}^{-1}(\theta_{ijk-1} - \theta_{ijk}) & 1 < k \leq N \\ K(\theta_{ijk-1} - \theta_{ijk}) & k = 1 \end{cases} \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$q_{ijk}^{ijk+1} = \begin{cases} \lambda_{\eta}^{-1}(\theta_{ijk} - \theta_{ijk+1}) & 1 \leq k < N \\ K(\theta_{ijk} - \theta_{ijk+1}) & k = N \end{cases} \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

Ukupni toplotni protok unet u ćeliju (i, j, k) zajedno sa toplotnim izvorom je:

$$Q_{ijk}^{un} = l_{\nu} l_{\eta} q_{i-1,jk}^{ijk} + l_{\xi} l_{\eta} q_{ij-1k}^{ijk} + l_{\xi} l_{\nu} q_{ijk-1}^{ijk} + q_{ijk}^L V_{ijk} \quad (11)$$

Ukupni toplotni protok iznet iz ćelije (i, j, k) zajedno sa toplotnim izvorom je:

$$Q_{ijk}^{iz} = l_{\nu} l_{\eta} q_{ijk}^{i+1,jk} + l_{\xi} l_{\eta} q_{ijk}^{ij+1k} + l_{\xi} l_{\nu} q_{ijk}^{ijk+1} + q_{ijk}^P V_{ijk} \quad (12)$$

Toplota akumulisana u ćeliji (i, j, k) je:

$$Q_{ijk}^A = c_n \rho_{ijk} \theta_{ijk} V_{ijk} \quad (13)$$

Tek sada se može postaviti jednačina toplotnog bilansa za (i, j, k) ćeliju:

$$\frac{dQ_{ijk}^A}{dt} = Q_{ijk}^{um} - Q_{ijk}^{iz} \quad (14)$$

tj. ako se izvrše odgovarajuće transformacije i uvede Kronekerov simbol dobija se:

$$\begin{aligned} \frac{d(c_n \rho_{ijk} \theta_{ijk} V_{ijk})}{dt} = & l_v l_\eta \left\{ (\lambda_\xi^{-1} (1 - \delta_{1i}) + K \delta_{1i}) (\theta_{i-1jk} - \theta_{ijk}) - (\lambda_\xi^{-1} (1 - \delta_{Ni}) + K \delta_{Ni}) (\theta_{ijk} - \theta_{i+1jk}) \right\} \\ & + l_\xi l_\eta \left\{ (\lambda_v^{-1} (1 - \delta_{1j}) + K \delta_{1j}) (\theta_{ij-1k} - \theta_{ijk}) - (\lambda_v^{-1} (1 - \delta_{Nj}) + K \delta_{Nj}) (\theta_{ijk} - \theta_{ij+1k}) \right\} \\ & + l_\xi l_v \left\{ (\lambda_\eta^{-1} (1 - \delta_{1k}) + K \delta_{1k}) (\theta_{ijk-1} - \theta_{ijk}) - (\lambda_\eta^{-1} (1 - \delta_{Nk}) + K \delta_{Nk}) (\theta_{ijk} - \theta_{ijk+1}) \right\} \\ & + (q_{ijk}^I - q_{ijk}^P) V_{ijk} \end{aligned}$$

$$\forall i, j, k = 1, 2, \dots, N, \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases} \quad (15)$$

Ako se izvrši grupisanje članova i uvedu sledeće oznake:

$$\begin{aligned} \mu_{ijk} = & l_v l_\eta \left(\lambda_\xi^{-1} (2 - \delta_{1i} - \delta_{Ni}) + K (\delta_{1i} + \delta_{Ni}) \right) \\ & + l_\xi l_\eta \left(\lambda_v^{-1} (2 - \delta_{1j} - \delta_{Nj}) + K (\delta_{1j} + \delta_{Nj}) \right) \\ & + l_\xi l_v \left(\lambda_\eta^{-1} (2 - \delta_{1k} - \delta_{Nk}) + K (\delta_{1k} + \delta_{Nk}) \right), \end{aligned} \quad (16)$$

$$T_{ijk} = \frac{c_n \rho_{ijk} V_{ijk}}{\mu_{ijk}}, \quad K_{ijk} = \frac{V_{ijk}}{\mu_{ijk}} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \xi_{1i} = l_v l_\eta (\lambda_\xi^{-1} (1 - \delta_{1i}) + K \delta_{1i}), & \quad \xi_{Ni} = l_v l_\eta (\lambda_\xi^{-1} (1 - \delta_{Ni}) + K \delta_{Ni}) \\ \nu_{1j} = l_\xi l_\eta (\lambda_v^{-1} (1 - \delta_{1j}) + K \delta_{1j}), & \quad \nu_{Nj} = l_\xi l_\eta (\lambda_v^{-1} (1 - \delta_{Nj}) + K \delta_{Nj}) \\ \eta_{1k} = l_\xi l_v (\lambda_\eta^{-1} (1 - \delta_{1k}) + K \delta_{1k}), & \quad \eta_{Nk} = l_\xi l_v (\lambda_\eta^{-1} (1 - \delta_{Nk}) + K \delta_{Nk}) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 K_{i-1,jk}^{ijk} &= \frac{\xi_{1i}}{\mu_{ijk}}, & K_{ijk}^{i+1,jk} &= \frac{\xi_{Ni}}{\mu_{ijk}}, \\
 K_{ij-1k}^{ijk} &= \frac{v_{1j}}{\mu_{ijk}}, & K_{ijk}^{ij+1k} &= \frac{v_{Nj}}{\mu_{ijk}}, \\
 K_{ijk-1}^{ijk} &= \frac{\eta_{1k}}{\mu_{ijk}}, & K_{ijk}^{ijk+1} &= \frac{\eta_{Nk}}{\mu_{ijk}},
 \end{aligned} \tag{19}$$

Jednačina toplotnog bilansa u ijk-toj ćeliji dobija se sada sledeći oblik:

$$\begin{aligned}
 T_{ijk} \frac{d\theta_{ijk}}{dt} + \theta_{ijk} &= K_{i-1,jk}^{ijk} \theta_{i-1,jk} + K_{ijk}^{i+1,jk} \theta_{i+1,jk} + K_{ij-1k}^{ijk} \theta_{ij-1k} + K_{ijk}^{ij+1k} \theta_{ij+1k} \\
 &+ K_{ijk-1}^{ijk} \theta_{ijk-1} + K_{ijk}^{ijk+1} \theta_{ijk+1} + K_{ijk} (q_{ijk}^I - q_{ijk}^P) \\
 \forall i, j, k &= 1, 2, \dots, N
 \end{aligned} \tag{20}$$

Jednačina (20) predstavlja jednačinu ponašanja (i, j, k) - te ćelije a ceo sistem diskretno-diferencijalnih jednačina određuje ponašanje objekta. Ako bi neki od indeksa θ_{ijk} imao vrednost 0 ili $N+1$ onda takvo θ predstavlja temperaturu odgovarajuće ćelije granice.

Za veličinu stanja vazduha u sobi usvajaju se fizičke veličine stanja, tj. temperatura vazduha u pojedinim ćelijama:

$$X_{ijk} = \theta_{ijk}, \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, N \tag{21}$$

što pokazuje da ima N^3 jednačina stanja. Poremećajne veličine su temperature ćelija granice prostorije

$$Z_{ijk} = \theta_{ijk}, \Leftrightarrow \min\{i, j, k\} = 0 \vee \max\{i, j, k\} = N + 1 \tag{22}$$

i poremećajni toplotni izvori i ponori označeni sa q_{ijk}^{Iz} i q_{ijk}^{Pz} pa je:

$$\begin{aligned}
 q_{ijk}^I &= q_{ijk}^{Iz} + q_{ijk}^{Iu}, & q_{ijk}^P &= q_{ijk}^{Pz} + q_{ijk}^{Pu} \\
 Z_{ijk} &= q_{ijk}^{Iz} - q_{ijk}^{Pz}, & U_{ijk} &= q_{ijk}^{Iu} - q_{ijk}^{Pu}
 \end{aligned} \tag{23}$$

Korišćenjem Ljapunovljeve transformacije kordinata uvode se relativna odstupanja sledećih veličina:

$$x_{ijk} = \frac{\theta_{ijk} - \theta_{ijk}^z}{\theta_{ijk}^z} \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, N,$$

$$z_{ijk} = \frac{\theta_{ijk} - \theta_{ijk}^N}{\theta_{ijk}^N} \Leftrightarrow \min\{i, j, k\} = 0 \vee \max\{i, j, k\} = N + 1 \quad (24)$$

$$z_{ijk} = \frac{q_{ijk}^{Iz} - q_{ijk}^{IzN} - q_{ijk}^{Pz} - q_{ijk}^{PzN}}{q_{ijk}^{IzN} - q_{ijk}^{PzN}} \quad q_{ijk}^{IzN} \neq q_{ijk}^{PzN} \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, N$$

$$u_{ijk} = \frac{q_{ijk}^{Iu} - q_{ijk}^{IuN} - q_{ijk}^{Pu} - q_{ijk}^{PuN}}{q_{ijk}^{IuN} - q_{ijk}^{PuN}} \quad q_{ijk}^{IuN} \neq q_{ijk}^{PuN} \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

Dobijaju se skalarne diferencijalne jednačine u obliku

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{T_{ijk}} \left\{ -x_{ijk1} + \frac{1}{\theta_{ijk}^z} \left(K_{i-1,jk}^{ijk} \left(\theta_{i-1,jk}^N z_{i-1,jk} \delta_{li} + x_{i-1,jk} \theta_{i-1,jk}^z (1 - \delta_{li}) \right) \right) \right.$$

$$+ K_{i+1,jk}^{i+1,jk} \left(\theta_{i+1,jk}^N z_{i+1,jk} \delta_{Ni} + \theta_{i+1,jk}^z x_{i+1,jk} (1 - \delta_{Ni}) \right)$$

$$+ K_{ij-1k}^{ijk} \left(\theta_{ij-1k}^N z_{ij-1k} \delta_{1j} + \theta_{ij-1k}^z x_{ij-1k} (1 - \delta_{1j}) \right)$$

$$+ K_{ijk}^{ij+1k} \left(\theta_{ij+1k}^N z_{ij+1k} \delta_{Nj} + \theta_{ij+1k}^z x_{ij+1k} (1 - \delta_{Nj}) \right)$$

$$+ K_{ijk-1}^{ijk} \left(\theta_{ijk-1}^N z_{ijk-1} \delta_{1k} + \theta_{ijk-1}^z x_{ijk-1} (1 - \delta_{1k}) \right)$$

$$+ K_{ijk}^{ijk+1} \left(\theta_{ijk+1}^N z_{ijk+1} \delta_{Nk} + \theta_{ijk+1}^z x_{ijk+1} (1 - \delta_{Nk}) \right)$$

$$+ K_{ijk} z_{ijk} \left(q_{ijk}^{IzN} - q_{ijk}^{PzN} \right) + K_{ijk} u_{ijk} \left(q_{ijk}^{IuN} - q_{ijk}^{PuN} \right) \quad (26)$$

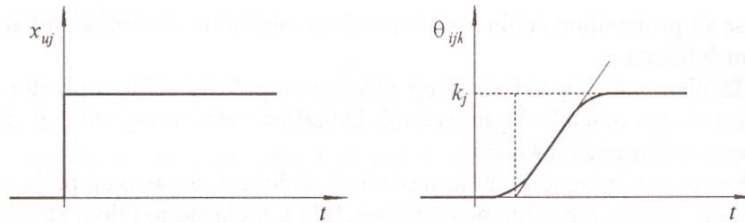
Ako se usvoji da je vektor stanja dat sa:

$$x = (x_{111} \quad x_{211} \quad x_{311} \cdots x_{N11} \cdots x_{NNN}) \quad (27)$$

onda je izlazna veličina obično temperatura neke (i,j,k) - te ćelije, gde se najčešće nalazi merni instrument.

$$x_i(t) = c^T x(t). \quad (28)$$

Potrebno je napomenuti da vektor stanja ima ukupno N^3 elemenata tj. veličina stanja, jer je toliki broj ćelija odnosno kombinacija indeksa i, j, k. Ako se posmatra promena izlazne veličine pri odskočnoj promeni upravljačke ili poremećajne, veličine dobija se funkcija sa kašnjenjem što je prikazano na slici 4.



Sl. 4 Odskočni odziv temperature
Fig. 4 Rebound response temperature

Približna jednačina ponašanja skladišta povrća i voća ima oblik:

$$T\ddot{x}_i(t) + \dot{x}_i(t) = \sum_{j=1}^m k_j x_{ij}(t - \tau_{kj}) \quad (29)$$

Čisto vremensko kašnjenje, javlja se usled vremena potrebnog za prenos signala sa jednog mesta na drugo (Debeljković i dr, 2002).

4. ZAKLJUČAK

Temperaturskom polju skladišta bez kretanja vazduha mogu se pridružiti razni modeli zavise od njegovih ciljeva proučavanja, tražene tačnosti i zahtevane jednostavnosti matematičkog modela. Zbog usvojenih pretpostavki prikazani model je najrealniji za ustaljene temperaturske režime u skladištima povrća i voća odnosno nakon izvesnog vremena skladištenja biomaterijala u njima. Temperaturni model skladišta prikazan u radu je bazičan i fleksibilan, tako da omogućava modeliranje svih primenjivanih skladišta povrća i voća kao i sukcesivnih delova u njima.

5. LITERATURA

- [1] Debeljković D, Mulić V, Simeunović G. 2002. *Dinamika razmenjivača toplote*, Čigoja štampa, Beograd, str. 175-183
- [2] Petrović D, Bugarić U, Petrović Z. 2009. [Analiza visokoregálnih skladišta bazirana na uticaju stohastičkih parametara](#), FME Transactions, vol. 37, br. 1, str. 39-46
- [3] Kostić M, Balešević-Tubić S, Tatić M, Lončarević V, Đorđević V, Đukić V, Ilić A. 2009. [Promena kvaliteta semena soje u zavisnosti od tipa skladišta i sadržaja vlage naturalnog semena](#), Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi / PTEP, vol. 13, br. 1, str. 85-87
- [4] Patierno G. 2008. [Izolacija rashladnog skladišta](#), Klimatizacija, grejanje, hlađenje, vol. 37, br. 4, str. 71-72
- [5] Đević M, Kosi F, Dimitrijević A. 2005. [Uslovi i značaj skladištenja crnog luka](#), Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi / PTEP, vol. 8, br. 1-2, str. 35-38
- [6] Kosi F, Đević M, Dimitrijević A. 2003. [Režim strujanja vazduha u uslovima skladištenja krompira](#), Poljoprivredna tehnika, vol. 27, br. 1-2, str. 51-61
- [7] Kosi F, Đević M, Dimitrijević A. 2008. [Tehnološki parametri i optimizacija klimatizacije industrijskih skladišta krompira](#), Klimatizacija, grejanje, hlađenje, vol. 32, br. 2, str. 29-35

Simonović V, i dr. (2011). Matematički model temperaturnog polja skladišta za povrće i voće bez strujanja vazduha. *Savremena poljoprivredna tehnika* 37(4): 409-418.

- [8] Brkić M, Šarić M., Gnip M, 2003. [Skladištenje zrna žitarica u hermetički zatvorenim skladištima](#). Časopis za procesnu tehniku i energetiku u poljoprivredi / PTEP, vol. 5, br. 3, str. 66-69

MATHEMATICAL MODEL OF TEMPERATURE FIELD OF STORAGE FOR VEGETABLES AND FRUITS WITHOUT AIR FLOW

Vojislav Simonović, Marko Dragić, Žarko Čebela, Dragan Krstić, Ivana Marković

SUMMARY

In this paper we modeled the impact of heat that gives vegetables and fruits during the storage as a product of respiration with CO₂ and water. For the purposes of modeling the entire warehouse is divided on the N³ parallelepiped and adopted the initial assumptions. The air is at rest in the boundary layer, the specific heat of air is equal to the warehouse at all points in the parallelepiped V there is a point C with temperature $\theta_c(t)$ and density $\rho_c(t)$ have mean values $\theta_{sr}(t)$ and $\rho_{sr}(t)$, the coefficient of the implementation heat between two adjacent cells is constant and independent of the position of these cells, the mean air density in the cell and it is constant for the entire cell. Control heat sources or sinks come from any electrical or thermal heating and cooling of the body, and disturbances originating from the thermal sources of stored vegetables and fruits. Their intensity is determined by the position of the driver or the quantity, condition and time of storage of biomaterials. At the end of the paper shows approximate storage temperature field equations with pure time delay that occurs due to the time required to transmit signals from one place to another, and the rebound temperature response diagram.

Key words: storage, vegetables and fruit, mathematical model

Rezultati istraživanja su deo projekta Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, program Tehnološki razvoj, pod nazivom „Istraživanje i razvoj opreme i sistema za industrijsku proizvodnju, skladištenje i preradu povrća i voća“, broj TR 35043.

Primljeno: 12. 09. 2011.

Prihvaćeno: 03. 12. 2011.