

## ULOGA TURBULENTNIH TOKOVA TOPLINE U PROCESIRANJU VERTIKALNE PROMJENE TEMPERATURE PRIZEMNOG SLOJA ZRAKA

### The role of turbulent heat fluxes in the processing of vertical temperature variations of the air layer near the ground

TANJA LIKSO

Državni hidrometeorološki zavod  
Grič 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Primljeno 21. travnja 1998, u konačnom obliku 1. lipnja 1998.

**Sažetak:** U ovom radu razmatra se mogućnost procjene temperature zraka na visini hrapavosti,  $z_0$ , pomoću mjerenih vrijednosti temperature zraka na 2 m visine, tijekom dana, uz pretpostavku da je osnovni mehanizam prijenosa topline od tla prema gore turbulentni tok osjetne topline. Teorijska simulacija vrijedi danju u neporemećenim uvjetima (anticiklonalna situacija). Zanimaren je utjecaj latentne topline isparavanja, advekcije i divergencije toka dugovalnog zračenja tla. Osnovna veličina u ovom modelu jest turbulentni tok osjetne topline,  $H = \rho c_p \overline{w'\Theta'}$  koji je određen indirektno kao funkcija primljene solarne radijacije.

**Cljučne riječi:** turbulentni tok osjetne topline, visina hrapavosti, solarna radijacija

**Abstract:** In this paper, a possibility to estimate air temperature at roughness length,  $z_0$ , by using screen height temperature during daytime is examined, assuming that the basic mechanism of heat transfer from ground upward is a turbulent sensible heat flux. The theoretical simulation is valid during daytime in undisturbed conditions (anticyclonic situation). The influence of the latent heat of evaporation, advection and the divergence of long-wave radiation flux has been neglected. In this model, the basic term is the turbulent sensible heat flux,  $H = \rho c_p \overline{w'\Theta'}$ , which has been determined indirectly as a function of solar irradiation.

**Key words:** turbulent sensible heat flux, roughness length, solar irradiation

## 1. UVOD

Simulacije vertikalnih varijacija dnevnog hoda temperature zraka počinju od traženja najpogodnijih analitičkih funkcija koje opisuju krivulje dnevnog hoda, do vrlo kompleksnih teorijskih modela, koji nastoje opisati fizikalne uzroke vremenskih varijacija temperature.

### 1.1. Simulacije prostorno-vremenskih varijacija temperature zraka prema Suttonu (1953)

a) Gibanje toplog zraka iznad hladne podloge

dovodi do izrazitih inverzija u prizemnim slojevima atmosfere. Matematički, to je slučaj zraka čiji je temperaturni profil u trenutku  $t = 0$  oblika  $T = T_0 - \beta z$  ( $\beta$  konstanta), a prelazi iznad hladne površine temperature  $T_1 < T_0$ . Izraz za vertikalni profil temperature sljedećeg je oblika:

$$T(z, t) = T_0 - \beta z + (T_1 - T_0) \operatorname{erfc} \frac{z}{\sqrt{4K_H t}} \quad (1.1.1)$$

Teorijski, efekt hladne površine širi se u beskonačnost za sve  $t > 0$ . Međutim, u praksi je prihvatljiva pretpostavka da je debljina sloja koji



se nalazi pod utjecajem površine dana izrazom  $z^2/4K_H t = 1$ .

b) Pri vedrom vremenu izraz za vertikalni profil temperature sljedećeg je oblika:

$$T(z, t) = T_0 + \sum_{n=1}^N T_n \exp\left(-z \sqrt{\frac{n\omega}{2K_H}}\right) \cos\left[n\omega t - \left(\varepsilon_n + z \sqrt{\frac{n\omega}{2K_H}}\right)\right] \quad (1.1.2)$$

Dakle, rješenje sadrži tranzijentni član i izraz koji prikazuje smanjenje amplitude temperaturnog vala s visinom. Veličina  $K_H$  predstavlja virtualnu vodljivost topline u zraku. Ona raste s visinom, tako da srednje vrijednosti  $K_H$  zadovoljavaju empirijski zakon

$$K_H = \text{const.} \cdot z^p \quad (1.1.3)$$

Za  $p = 1.8$  dobiva se zadovoljavajući stupanj točnosti.

### 1.2. Simulacija prostorno-vremenskih varijacija temperature zraka prema Anfossiju i dr. (1957)

U periodu noćne tišine izraz

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1.2.1)$$

naziva se jednadžbom noćnog transfera topline (Fickova jednadžba difuzije). Njeno je analitičko rješenje:

$$T(z, t) - T(0, 0) = [T(0, t) - T(0, 0)] \left\{ \exp\left[-\left(\frac{z^2}{4Kt}\right)\right] - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{\pi}{Kt}} \operatorname{erfc}\left[\frac{z}{\sqrt{4Kt}}\right] \right\} \quad (1.2.2)$$

gdje je  $T(0, 0)$  referentna temperatura na nivou  $z = 0$  u trenutku  $t = 0$ , a  $K$  koeficijent difuzije topline u zraku. Jednadžba (1.2.2) omogućuje određivanje vertikalnog profila temperature  $T(z, t)$  na osnovi trenda površinske temperature i odgovarajuće vrijednosti  $K$ . U uvjetima povoljnima za razvoj radijacijskih inverzija, jednadžba

s vrijednošću  $K = 3 \cdot 10^3 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  pokazuje dobro slaganje s motrenjima do 40 m visine, a za  $40 \text{ m} < z < 120 \text{ m}$  javljaju se veća odstupanja. Tomu je razlog gruba pretpostavka o konstan-

tnosti koeficijenta difuzije s visinom, iako znamo da on varira s visinom, za što postoje različiti teorijski pristupi (npr. relacija 1.1.3).

### 1.3. Fizikalno tumačenje danje i noćne promjene temperature zraka u termometrijskoj kućici (modeli Kuo, 1968 i Grisogono, 1991)

Danju zrak oko termometra dobiva toplinu turbulentnim miješanjem (vođenjem) topline od uskog sloja (nekoliko milimetara) zraka uz tlo, koji se direktnim molekularnim vođenjem zagrijava od tla. Lokalna promjena temperature danju (ljetni period) na nivou  $z = 2 \text{ m}$  ovisi o vertikalnoj promjeni toka osjetne topline. Zbog toga pišemo

$$\frac{\partial T}{\partial t} \propto \frac{\partial H}{\partial z} \quad (1.3.1)$$

gdje predznak ovisi o definiciji smjera toka osjetne topline,  $H$ . Dakle, razmjena topline između tla (često se počinje od visine hrapavosti  $z_0$ ) i nivoa  $z = 2 \text{ m}$  obavlja se preko toka osjetne to-

pline,  $H$ . Prevladava mišljenje da je danju utjecaj divergencije radijacijskih tokova zanemariv.

Noću, u zimskom periodu nema termalno razvijenog prizemnog sloja atmosfere. Proces razmjene topline puno su kompliciraniji i kompleksniji. Na promjenu temperature dominantno dje-



luje divergencija toka dugovalnog zračenja tla pa je

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial R_L}{\partial z} \quad (1.3.2)$$

gdje je

$\partial T/\partial t$  — lokalna promjena temperature uvjetovana radijacijom,

$\partial R_L/\partial z$  — konvergencija ili divergencija neto toka dugovalne radijacije.

Naglasimo da je noću neto-radijacija određena neto-dugovalnom radijacijom ( $R_N = R_L$ ), jer nema primitka solarne energije.

**1.3/1. — Opisane procese detaljno analizira Kuo (1968), a njegova relacija za danju promjenu potencijalne temperature jest**

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \frac{\partial \theta}{\partial z} + \left( \frac{\cos u}{\rho c_p} \right) S \right\} - a^2 (\theta - \bar{\theta}) \quad (1.3.3)$$

$$K = K_t + K_r \quad (1.3.4)$$

gdje je

$\theta$  — potencijalna temperatura atmosfere na visini  $z$ ,

$\bar{\theta}$  — srednja vrijednost potencijalne temperature atmosfere u sloju od površine tla do visine  $z = 2\text{ m}$ ,

$K_t$  — turbulentna termalna vodljivost atmosfere,

$K_r$  — radijacijska vodljivost,

$K$  — virtualna vodljivost,

$u$  — solarni zenitni kut,

$\rho c_p$  — toplinski kapacitet atmosfere,

$S$  — intenzitet solarne radijacije,

$a^2$  — koeficijent hlađenja atmosfere.

Relacija (1.3.3) za noćni period poprima jednostavniji oblik jer je tada  $S = 0$ . Dakle, lokalna promjena potencijalne temperature (noću) dana je sljedećim izrazom:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (K_t + K_r) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - a^2 (\theta - \bar{\theta}) \quad (1.3.5)$$

$K_t$  vrlo je malo u noćnim satima jer je zbog veće

stabilnosti atmosfere (česte inverzije) turbulentna termalna difuzivnost smanjena. Radijacijska vodljivost  $K_r$  odnosi se na onaj dio dugovalne radijacije  $R_{L\uparrow\downarrow}$ , što ga apsorbiraju atmosferski plinovi, djelujući tako na temperaturu zraka na nivou motrenja, tj. na visini  $z = 2\text{ m}$ . Drugi član jednadžbe (1.3.5) odnosi se na hlađenje atmosfere, što je noću dominantan proces, zbog emisije dugovalne radijacije.

**1.3/2. — Grisogono (1991) ispituje lokalnu promjenu temperature uslijed radijacije pomoću izraza**

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial F_N}{\partial z} \quad (1.3.6)$$

gdje je

$T(z,t)$  — apsolutna temperatura zraka kao funkcija visine i vremena,

$\rho$  — gustoća zraka,

$c_p$  — specifična toplota pri konstantnom tlaku,

$F_N$  — neto tok dugovalne radijacije ( $F_N = F_{\uparrow} - F_{\downarrow}$ ).

Veličina  $\partial F_N/\partial z$  dominantna je noću, što ne znači (premda nije eksperimentalno utvrđeno) da nema udjela u dnevnom hodu temperature i danju.

U ovom se radu ispituje mogućnost da se pomoću mjerenja temperature na 2 m visine očitani temperatura na visini hrapavosti  $z_0$ , tijekom dana, uz pretpostavku da je osnovni mehanizam prijenosa topline od tla prema gore turbulentni tok osjetne topline. Prema tome, razmatra se danji dio dnevnog hoda temperature tijekom kojeg se zanemaruje divergencija toka dugovalnog zračenja tla. Pretpostavlja se anticiklonalna situacija, dakle jedno neporemećeno stanje (zanemaruje se advekcija). U modelu se koristi pretpostavka o izotropnoj turbulenciji, iako ona striktno vrijedi jedino u inercijalnom subpodručju. S obzirom na danji period (labilna stratifikacija) turbulentni su vrtlozi najrazvijeniji i na dovoljnoj udaljenosti od tla ( $z = 2\text{ m}$ ), čime se eliminira utjecaj podloge na deformaciju vrtloga pa se oni nalaze u stanju koje je najbližije izo-



tropnom. Model koristi podatke danje promjene temperature zraka u termometrijskoj kućici i proračunava promjenu temperature tla (odnosno tik uz tlo na visini hrapavosti,  $z_0$ ).

## 2. FIZIKALNA OSNOVA MODELA

Razmatranje u ovom radu polazi od Boussinesqueove aproksimacije, koja u prizemnom sloju atmosfere povezuje kinematički tok osjetne topline,  $\overline{w'\Theta'}$  s vertikalnim temperaturnim gradijentom:

$$\overline{w'\Theta'} = -K_h \frac{\partial \Theta}{\partial z} \quad (2.1)$$

gdje je

$K_h$  — koeficijent turbulentne razmjene topline,

$\partial \Theta / \partial z$  — promjena potencijalne temperature po vertikali.

U model nije uključena advekcija jer se razmatra neporemećeno stanje (anticiklonalna situacija). Potencijalna temperatura na 2 m visine  $\Theta(z)$  dana je formulom

$$\Theta(z) = T(z) + h\delta \quad (2.2)$$

gdje je

$\delta$  —  $1^\circ/100$  m (suhoadijabatička stopa ohlađivanja/zagrijavanja),

$h$  — zbroj nadmorske visine postaje i visine termometra nad tlom.

Cilj je procijeniti promjenu potencijalne temperature na visini hrapavosti  $\Theta(z_0)$  u danjem periodu, a u tu svrhu treba odrediti veličine  $K_h$  i  $\overline{w'\Theta'}$ .

$$\overline{w'\Theta'} = \frac{H}{\rho c_p} \quad (2.3)$$

gdje je

$H$  — turbulentni tok osjetne topline,

$\rho$  — gustoća zraka,

$c_p$  — specifična toplina zraka.

Koeficijent turbulentne razmjene topline,  $K_h$ ,

određuje se na osnovi teorije sličnosti u prizemnom sloju i ima oblik

$$K_h = \frac{ku_*z}{\Phi_m^2} \quad (2.4)$$

gdje je brzina trenja

$$u_* = \frac{ku}{\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_m \left( \frac{z}{L} \right)} \quad (2.5)$$

a  $\Phi_m$  i  $\Psi_m$  jesu univerzalna funkcija sličnosti i njena integralna vrijednost.

## 3. ALGORITAM PRORAČUNA

1) Prvo se grafički prikaže poznati dnevni hod temperature zraka na visini  $z = 2$  m. Na dnevnom hodu temperature zraka, svakom satu pridruži se odgovarajuća klasa stabilnosti po Pasquillu (Aray, 1988, str. 57). Pridruživanje se obavlja na sljedeći način: klasa D (neutralno) odgovara satu izlaska/zalaska Sunca, dok su sati oko temperaturnog maksimuma ocijenjeni najlabilnijom klasom A. Ostalim satima dodijeljene su klase stabilnosti između A–D, a ocijenjene su prema temperaturnoj promjeni. Razmatra se labilna stratifikacija od izlaska do zalaska Sunca, dakle klase stabilnosti: D–neutralno, C–malo labilno, B–umjerenno labilno i A–jako labilno. Labilnost se održava do ranih poslijepodnevni sati i dalje se opet smanjuje prema klasi D. Pretpostavlja se da je u vrijeme  $t_{0,u}$  neutralno stanje ( $t_{0,u}$  = prvi sat s neutralnom stabilnošću u uzlaznom dijelu danjeg hoda temperature zraka).

2) Dalje se određuje brzina trenja  $u_*$ . U tu svrhu potrebno je izračunati brzinu nastalog strujanja,  $u$ , samo na osnovi termičkog utjecaja. Zanimarivanjem članova turbulentne i molekularne disipacije kao i divergencije, te dinamičkih faktora generiranja, jednadžba kinetičke energije turbulencije dobiva jednostavan oblik

$$\frac{\partial E}{\partial t} \approx \frac{g}{\Theta} \overline{w'\Theta'} \quad (3.1)$$

Strujanje zraka, generirano termičkim faktorom, uvodi se u jednadžbu (3.1) pomoću perturbirane brzine:

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.2)$$

gdje je

- $u$  — brzina nastalog strujanja,
- $\bar{u}$  — srednja vrijednost brzine vjetra,
- $u'$  — perturbacija brzine vjetra (odstupanje brzine vjetra od njegove srednje vrijednosti).

Budući promatramo situacije bez advekcije,  $\bar{u} = 0$ , te je:

$$u = u' \quad (3.3)$$

S izlaskom Sunca atmosfera se labilizira i dolazi do razvoja turbulentnih vrtloga. Na razvoj turbulencije u početku djeluje samo termički faktor. Daljnjom labilizacijom atmosfere zrak se sve više miješa i struji preko podloge. Hrapavost podloge uzrokuje mehaničko generiranje turbulencije. Dakle, početna, termički izazvana tur-

bulencija dovodi dalje do njenog mehaničkog generiranja zbog blizine podloge.

Izraz za kinetičku energiju turbulencije jest

$$E = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (3.4)$$

gdje su

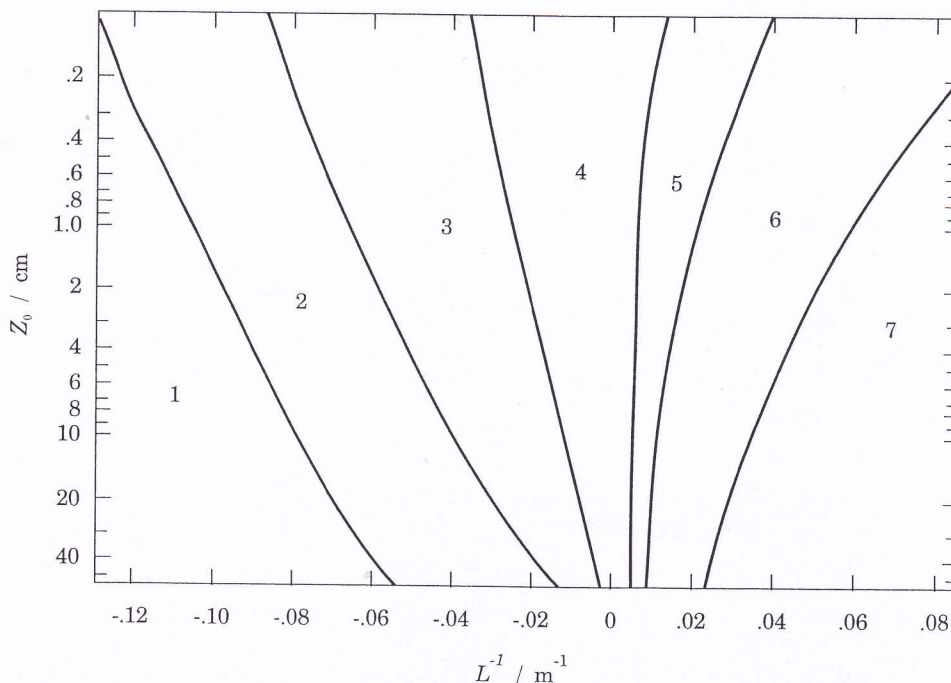
$$\overline{u'^2}, \overline{v'^2} \text{ i } \overline{w'^2}$$

varijance komponenti vektora brzine. S obzirom na izmiješanost graničnog sloja za vrijeme labilne stratifikacije, teorijsko razmatranje može se pojednostavniti uvođenjem pretpostavke o izotropnoj turbulenciji

$$(\overline{u'^2} = \overline{v'^2} = \overline{w'^2})$$

pa izraz (3.4) postaje

$$E = \frac{3}{2} \overline{u'^2} \quad (3.5)$$



Slika 1.  $L$  kao funkcija Turnerove klase stabilnosti i  $z_0$  prema Golderu (1972) (Panofsky i Dutton, 1984, sl. 6.6)

Figure 1  $L$  as a function of Turner's stability class and  $z_0$  according to Golder (1972) (Panofsky & Dutton, 1984, fig. 6.6)



Supstitucijom (3.5) u jednadžbu (3.1) dobivamo

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{3}{2} \overline{u^2} = \frac{g}{\Theta} \overline{w'\Theta'} \quad (3.6)$$

Integracija pomoću konačnih diferencija daje

$$u(t + \Delta t) \approx u(t) + \left\{ \left( \frac{2g}{3\Theta} \right) \overline{w'\Theta'}(t + \Delta t) - \overline{w'\Theta'}(t) \right\} \Delta t \quad (3.7)$$

Apsolutna vrijednost unutar izraza (3.7) nužna je zbog realnog korijena kod poslijepodnevnne, silazne grane danjeg hoda. Budući da istovremeno s procesom generiranja turbulencije dolazi do procesa disipacije (u početku samo turbulentna disipacija  $\varepsilon$ , a poslije, i molekularna disipacija  $\nu$ , Stull, 1988), a i zbog činjenice da je u jednadžbi turbulentne kinetičke energije promatran samo termički utjecaj, fizikalno je opravdano da se u jednadžbi (3.7) zadrži samo drugi član koji označava termičko generiranje turbulencije u svakom satu. Prema tome, brzina vjetera u pojedinom satu proračunava se izrazom

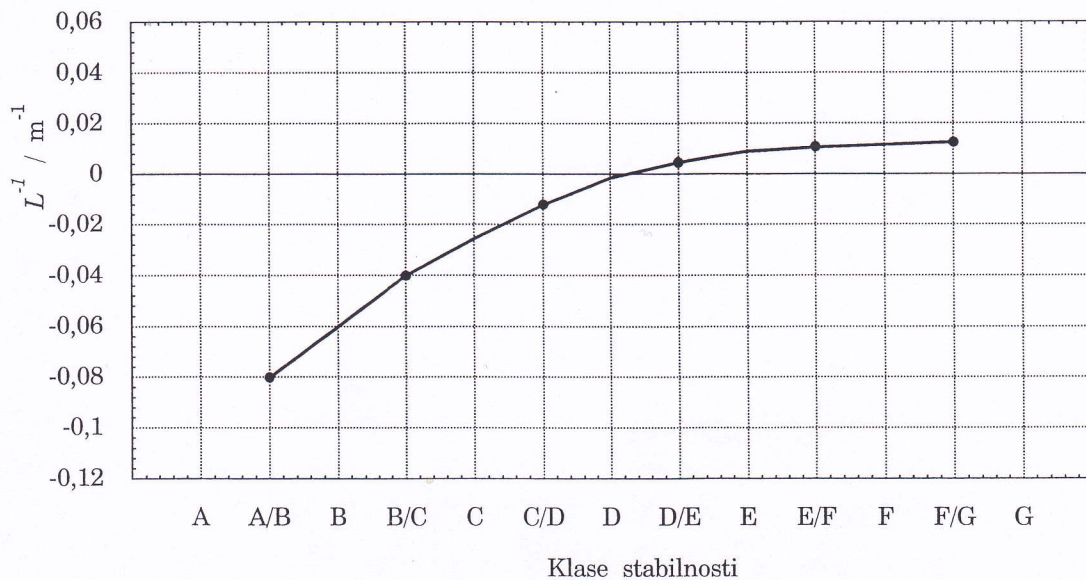
$$u \approx \left\{ \left( \frac{2g}{3\Theta} \right) \overline{w'\Theta'}(t + \Delta t) - \overline{w'\Theta'}(t) \right\} \Delta t \quad (3.8)$$

gdje je  $\Delta t = 1\text{h} = 3600\text{ s}$ . Proračun formulom (3.8) počinje u satu,  $t_0$ , kojem je pridijeljena kla-

sa neutralne stabilnosti  $D$ , kada je  $\overline{w'\Theta'}(t_0) = 0$ , provodi se tijekom labilnog danjeg perioda i okončava se u večernjem satu, kome je ponovo pridijeljen razred stabilnosti  $D$ .

2.1 —  $\overline{w'\Theta'}$  određuje se iz Smithova dijagrama (Sl. 3, Pasquill i Smith, 1983). Za poznate vrijednosti primljene solarne radijacije  $Q(\text{Wm}^{-2})$  iz Smithova dijagrama očitaju se vrijednosti prizemnog toka osjetne topline  $H(\text{Wm}^{-2})$ , te iz relacije

$$\overline{w'\Theta'} = \frac{H}{\rho c_p} \quad (3.9)$$



Slika 2. Vrijednosti  $L^{-1} (\text{m}^{-1})$  (vidi sl. 1) kao funkcija Turnerovih klasa stabilnosti za duljinu hrapavosti  $z_0 = 10\text{ cm}$

Figure 2 Values of  $L^{-1} (\text{m}^{-1})$  (see fig. 1) as a function of Turner's stability classes for roughness length  $z_0 = 10\text{ cm}$



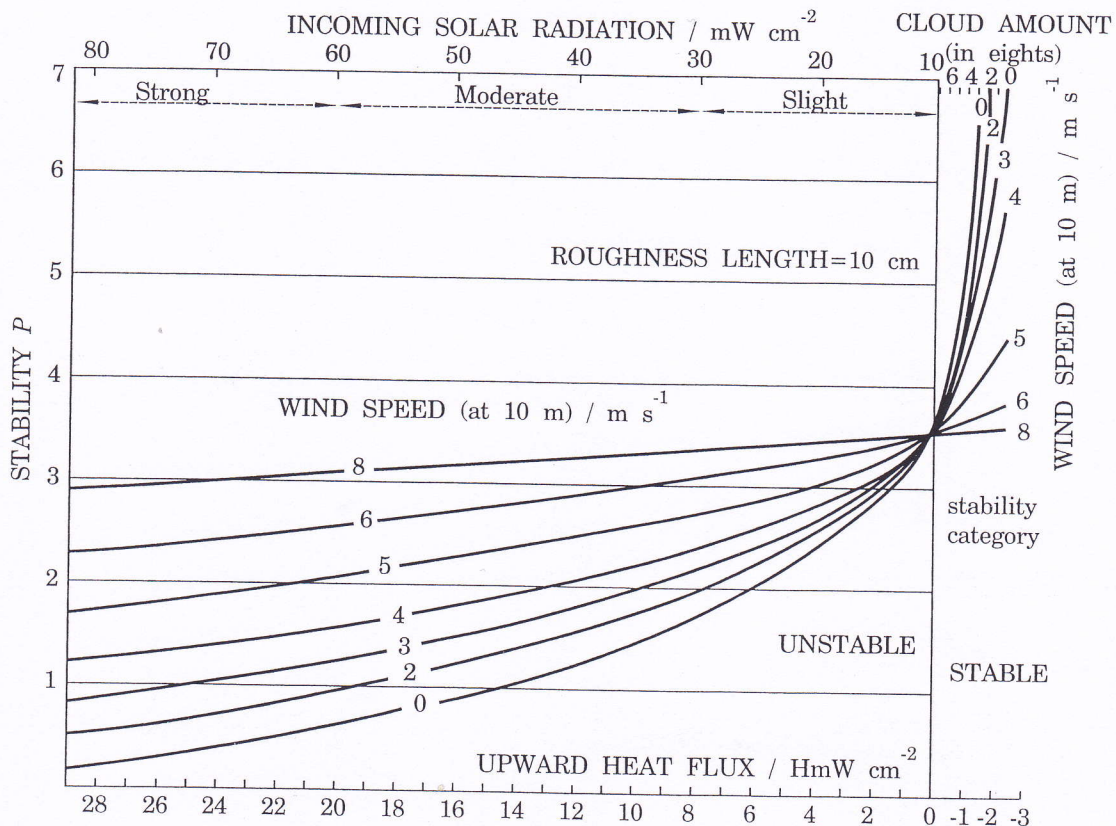
odrede vrijednosti  $\overline{w'\Theta'}$  za svaki sat. Vrijednosti  $Q$  za svaki sat uzete su iz rada I. i B. Penzar („Satne vrijednosti dozračene Sunčeve energije pri uvjetima vedrog neba”, *Geofizika*, Vol. 8, 1991).

2.2 — U formulu za proračun brzine strujanja zraka uslijed termički generirane turbulencije ulazi vrijednost kinematičkog turbulentnog toka osjetne topline  $\overline{w'\Theta'}$ . Ta veličina određuje se pomoću Smithova dijagrama (Sl. 3), a zatim se primjenjuje za proračun brzine,  $u$ , na visini 2 m iznad tla. Međutim, Smithov dijagram služi za određivanje stabilnosti atmosfere na osnovi brzine vjetra na 10 m, te prizemnog turbulentnog toka osjetne topline  $H$  (danji uvjeti) ili naoblake (noćni uvjeti) za hrapavost podloge  $z_0 = 10$  cm. Prema tome, podaci u tom dijagramu povezuju  $H$  sa strujanjem na

10 m uz ocjenu stabilnosti atmosfere. Iz toga proizlazi zaključak da brzina nastalog strujanja,  $u$ , dobivena relacijom (3.8), vrijedi za visinu  $z = 10$  m. Stoga treba brzinu strujanja zraka, određenu formulom (3.8) za visinu 10 m svesti na 2 m visine po logaritamskom zakonu:

$$u(2) = \frac{u(10)}{\ln \frac{10}{2}} \quad (3.10)$$

2.3 — Za proračun brzine trenja  $u_*$ , koja ulazi u izraz za  $K_h$ , potrebna je dalje vrijednost Monin–Obukhove duljine za svaki sat. Dijagram Goldera (Sl. 1) daje  $L$  kao funkciju Turnerovih klasa stabilnosti (1–7) i  $z_0$ . Za pretpostavljenu visinu hrapavosti  $z_0$  očitaju se vri-



Slika 3. Dijagram za određivanje stabilnosti atmosfere na osnovi brzine vjetra na 10 m, prizemnog turbulentnog toka osjetne topline (danju) ili naoblake (noću) za hrapavost površine  $z_0 = 10$  cm (Pasquill i Smith, 1983, sl. 6.10)

Figure 3 The diagram for determining atmospheric stability on the basis of wind speed at 10 m above the ground, turbulent sensible heat flux near the ground (in the daytime) or cloudiness (at night) for roughness length  $z_0 = 10$  cm (Pasquill & Smith, 1983, fig. 6.10)



Tablica 3.1. Satni srednjaci temperature zraka na dvije visine ( $z = 2$  m i  $z_0 = 10$  cm) u °C na obronku koji ima južnu ekspoziciju (Križevci:  $\varphi = 46^\circ 02'N$ ,  $\lambda = 16^\circ 35'E$ , nadmorska visina  $H = 146$  m). Mjerene vrijednosti  $T(z)$  i  $T(z_0)$  odnose se na razdoblje motrenja 17.–22.7.1955.

Table 3.1 Hourly air temperature means (°C) on two heights ( $z = 2$  m and  $z_0 = 10$  cm) on the hill-side with south exposition (Križevci:  $\varphi = 46^\circ 02'N$ ,  $\lambda = 16^\circ 35'E$ , altitude  $H = 146$  m). The measured values  $T(z)$  and  $T(z_0)$  are referred to the observation period 17–22 July 1955

Mjerene vrijednosti												
Sati	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$T(z)$	21,9	23,1	24,6	25,7	26,7	27,5	28,2	28,2	28,2	27,6	27,4	26,3
$T(z_0)$	22,2	24,7	27,3	29,1	30,3	31,3	31,8	32,0	31,8	30,2	29,0	26,8
$\Delta T$	-0,3	-1,6	-2,7	-3,4	-3,6	-3,8	-3,6	-3,8	-3,6	-2,6	-1,6	-0,5
Teorijske vrijednosti												
$T_t(z_0)$	22,30	24,09	26,33	28,23	29,25	31,30	31,34	31,07	31,09	29,43	28,39	26,55
$\Delta T_t$	-0,40	-0,99	-1,73	-2,53	-2,55	-3,80	-3,14	-2,87	-2,89	-1,83	-0,99	-0,25

jednosti  $1/L$  ( $m^{-1}$ ) na granicama između dviju susjednih klasa. Grafički se prikazu vrijednosti  $1/L$  u funkciji klasa stabilnosti (Sl. 2). Za sredinu određene klase (1–4 tj. A–D) s grafa se očitaju vrijednosti  $1/L$ . Prema tome, vrijednosti Monin–Obukhove duljine (ulazni podaci) predstavljaju srednju vrijednost  $L$  unutar određene klase stabilnosti, osim u satu prije nastupa neutralnog stanja, gdje je samo testiranje modela ukazalo na potrebu korištenja

vrijednosti  $L$ , koja odgovara prijelaznoj klasi C/D. Pomoću njih izračuna se vrijednost

$$x = \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.11)$$

koja je potrebna za izračunavanje funkcije  $\Psi_m(z/L)$ . Oblik funkcije  $\Psi_m(z/L)$ , koja vrijedi za labilnu stratifikaciju, jest

Tablica 3.2. Satni i dani srednjaci temperature površine tla (°C) i temperature zraka (°C) na 2 m visine u Križevcima ( $\varphi = 46^\circ 02'N$ ,  $\lambda = 16^\circ 35'E$ ,  $H = 146$  m). Danjim srednjacima definiraju se srednjaci dobiveni iz satnih vrijednosti od 8 ili 9 sati ujutro, do 17 ili 18 sati poslijepodne. Mjerene vrijednosti  $T(z)$  i  $T(z_0)$  odnose se na razdoblje motrenja 24.7.–27.8.1953.

Table 3.2 Hourly and daily means of the surface temperature (°C) and air temperature (°C) on 2 m in Križevci ( $\varphi = 46^\circ 02' N$ ,  $\lambda = 16^\circ 35' E$ ,  $H = 146$  m). Means, which have been obtained from hourly values from 8 or 9 a.m. to 5 or 6 p.m., are defined as daily means. The measured values are referred to the observation period 24 July–27 August 1953

Mjerene vrijednosti												
Sati	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$T(z)$	–	–	20,1	22,9	23,7	23,9	25,5	25,9	26,3	25,7	25,6	–
$T(z_0)$	–	–	20,6	25,3	27,1	27,3	29,1	29,2	29,1	28,0	25,6	–
$\Delta T$	–	–	-0,5	-2,4	-3,4	-3,4	-3,6	-3,3	-2,8	-2,3	0,0	–
Teorijske vrijednosti												
$T_t(z_0)$	–	–	20,10	25,41	26,23	27,68	28,62	28,75	29,17	27,92	25,60	–
$\Delta T_t$	–	–	0,00	-2,51	-2,53	-3,78	-3,12	-2,85	-2,87	-2,22	0,00	–



$$\Psi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \ln\left[\left(\frac{1+x^2}{2}\right)\left(\frac{1+x}{2}\right)^2\right] - 2\arctan x + \frac{\pi}{2} \quad (3.12)$$

2.4 — Dalje slijedi izračunavanje brzine trenja  $u_*$  po formuli

$$u_* = \frac{ku(2)}{\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_m\left(\frac{z}{L}\right)} \quad (3.13)$$

gdje je

- $k$  — von Karmanova konstanta  
 $u(2)$  — brzina nastalog strujanja na visini  $z = 2$  m.

3) Zatim se računa funkcija  $\Phi_m(z/L)$ , čiji je oblik za labilnu stratifikaciju ovaj:

$$\Phi_m\left(\frac{z}{L}\right) = \left(1 - 16\frac{z}{L}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.14)$$

4) Sljedeći je korak izračunavanje koeficijenta turbulentne razmjene topline,  $K_h$ , po formuli:

$$K_h = \frac{ku_*z}{\Phi_m^2} \quad (3.15)$$

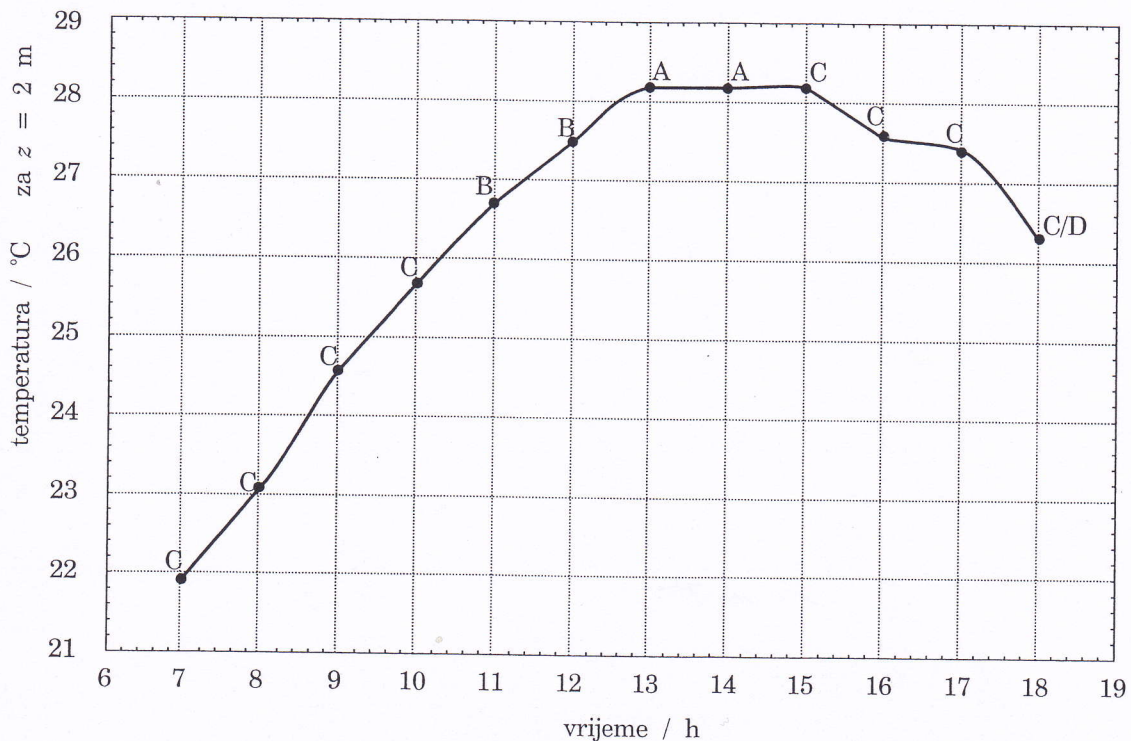
5) Slijedi proračun promjene potencijalne temperature,  $\partial\Theta/\partial z$ , po vertikali iz relacije

$$\frac{\partial\Theta}{\partial z} = -\frac{\overline{w'\Theta'}}{K_h} \quad (3.16)$$

(Vrijednosti  $\overline{w'\Theta'}$  određene su u točki 2.1).

Potencijalna temperatura na visini hrapavosti dobiva se iz izraza

Na kraju se određuje razlika potencijalne tem-



Slika 4. Srednji dani hod temperature zraka na 2 m visine uz pripadne klase stabilnosti u Križevcima za razdoblje motrenja 17.-22.7.1955.

Figure 4 Mean daily air temperature variation at screen height with corresponding stability classes in Križevci, for the observation period 17-22 July 1955



$$\Theta(z_0) = \Theta(z) - (z - z_0) \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \Theta(z) + (z - z_0) \frac{w' \Theta'}{K_h} \quad (3.17)$$

perature na visini  $z = 2$  m,  $\Theta(z)$ , i potencijalne temperature na visini hrapavosti,  $\Theta(z_0)$ , po formuli

$$\Delta \Theta = \Theta(z) - \Theta(z_0) \quad (3.18)$$

#### 4. TESTIRANJE MODELA

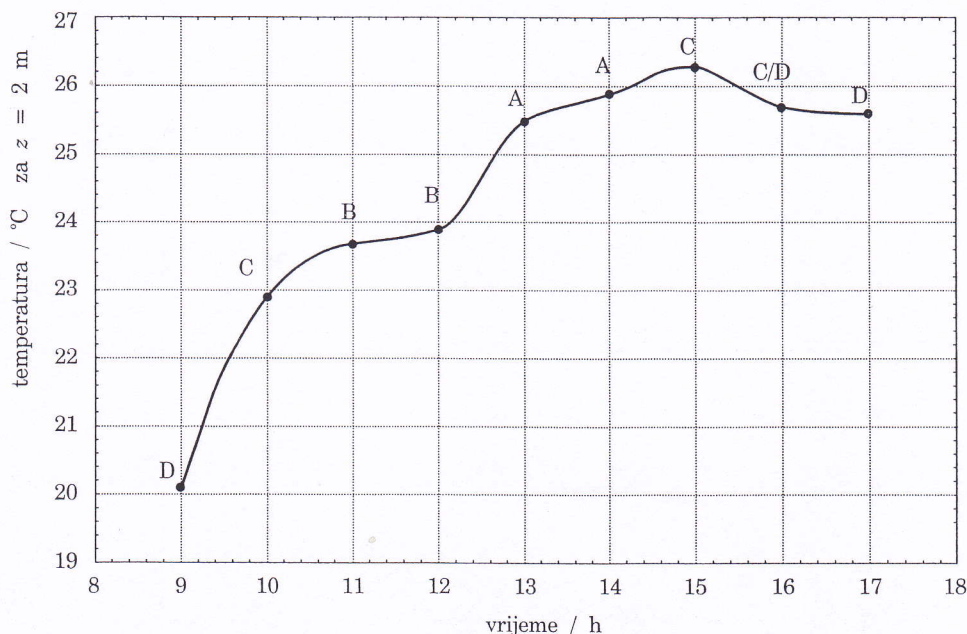
Model je testiran pomoću mjerenih podataka o temperaturi zraka na različitim visinama u Križevcima za period motrenja 17.–22.7.1955. (Maksić i dr. „Klimatske i agroklimatske osobine južnog kalničkog prigorja”, 1962). U korištenom radu nisu nađeni podaci o meteorološkim uvjetima u vrijeme motrenja (je li bilo vjetera i sl.), što bi omogućilo bolju interpretaciju rezultata, budući da opisani model ne uvažava advekciju.

Kao ulazni podaci modela korišteni su satni

srednjaci temperature zraka za meteorološku postaju na obronku koji ima južnu ekspoziciju, zbog čega su uzeti i odgovarajući podaci o solarnoj radijaciji za plohu nagnutu prema jugu pod kutom  $35^\circ$  (I. i B. Penzar, „Satne vrijednosti dozračene Sunčeve energije pri uvjetima vedrog neba”, *Geofizika*, Vol. 8, 1991). Radi lakše usporedbe s mjerenim podacima teorijske su vrijednosti podataka za potencijalnu temperaturu,  $\Theta$ , prevedene na temperaturu,  $T$ .

Drugi dio tablice donosi teorijske vrijednosti temperature zraka ( $^\circ\text{C}$ ) na visini hrapavosti  $T_t(z_0)$  i pripadne temperaturne razlike  $\Delta T_t$  ( $\Delta T_t = T(z) - T_t(z_0)$ ), dobivene prema opisanom algoritmu, na osnovi poznatih vrijednosti temperature na visini  $z = 2$  m,  $T(z)$ .

Testiranje modela provedeno je i na mjerenim vrijednostima temperature zraka na različitim visinama u Križevcima („Mikroklimatološka



Slika 5. Srednji dani hod temperature zraka na 2 m visine uz pripadne klase stabilnosti u Križevcima za razdoblje motrenja 24.7.–27.8.1953.

Figure 5 Mean daily air temperature variation at the screen height with corresponding stability classes in Križevci, for the observation period 24 July–27 August 1953



istraživanja Geofizičkog instituta u kotaru Križevci 1953", 1956). U razdoblju kada su vršena ova mikrometeorološka istraživanja (24.7. – 27.8.1953.) prevladavalo je pretežno lijepo vrijeme (anticiklonalna situacija), a to je u skladu s osnovnom pretpostavkom modela (nema advekcije).

Tablice prikazuju vertikalnu promjenu temperature  $T$  nad strništem, zato što opisani model ne uvažava prisutnost vegetacije.

## 5. ZAKLJUČAK

Opisani model ne uključuje advekciju i stoga se može koristiti za procjenu površinske temperature (danju) u neporemećenim uvjetima (anticiklonalna situacija), ako se raspolože mjerenim vrijednostima temperature u prizemnom sloju atmosfere na 2 m visine. Testiranje modela dalo je zadovoljavajuće rezultate. To pokazuje opravdanost osnovne pretpostavke o dominantnoj ulozi turbulentnog toka osjetne topline u procesiranju danjeg hoda temperature.

Teorijske vrijednosti  $\Delta\Theta$  ovise prvenstveno o turbulentnom toku osjetne topline  $H$ , odnosno o primljenoj solarnoj radijaciji  $Q$ . Zbog toga se testiranjem modela na podacima mjerenim u Križevcima (vidi tablice 3.1 i 3.2), dobivaju iste vrijednosti  $\Delta\Theta$  uz istu ocjenu klase stabilnosti. Drugim riječima, ako bi se opisani model koristio na nekoj drugoj geografskoj širini, uz istu klasu stabilnosti, dobile bi se drugačije vrijednosti  $\Delta\Theta$ , jer se dozračena solarna radijacija mijenja s geografskom širinom (kao i s nagibom plohe).

Testiranje je pokazalo, da se izvedenim algoritmom može iz podataka mjerenja temperature zraka na 2 m iznad tla procijeniti površinska temperatura tla tijekom dana u anticiklonalnim situacijama i time dobiti koristan agrometeorološki pokazatelj.

Model ne uvažava prisutnost vegetacije, te daje bolje slaganje s mjerenim vrijednostima temperature tla na strništu nego na livadi. To je u skladu s činjenicom da vegetacija umanjuje

dnevni raspon površinske temperature.

Odstupanja teorijskih  $\Delta T_t$  i mjerenih vrijednosti  $\Delta T$  ipak postoje. Po mišljenju autora odstupanje nije uzrokovano samo mogućom ulogom advekcije u mjerenim podacima kao i isparavanja, koje nije sadržano u modelu. Naime, postoji vjerojatnost da na termometar u kućici danju također djeluje divergencija toka dugovalnog zračenja (odnosno reemisija raspršenog dugovalnog zračenja tla, što se zbog primarnog efekta solarne radijacije danju obično zanemaruje). Taj bi efekt trebalo posebno ispitati.

Naglasimo da model još uvijek nije dobro razvijen i treba dodatno ispitati način pridjeljivanja klase stabilnosti početnom/završnom satu proračuna, tj. satu nakon neutralnog stanja (uzlazna grana danjeg hoda), odnosno satu prije nastupa stanja neutralne stabilnosti (silazna grana danjeg hoda). Poznato je da su neutralna stanja kratkotrajna i teško je procijeniti je li ono nastupilo u određenom satu ili u vremenskom intervalu između dva sata. Za sada se ne može sa sigurnošću tvrditi s kojom klasom stabilnosti treba započeti proračun (klasom C ili klasom C/D). To je pitanje predmet budućeg istraživanja. Dakle, vrijednosti  $\Theta(z_0)$  u početnom i završnom satu najmanje su pouzdane, dok ostale pokazuju dobro slaganje s mjerenjima.

**ZAHVALA:** Autor posebno zahvaljuje dr Nadeždi Šinik na korisnim sugestijama pri izradi ovog članka.

## 6. LITERATURA

- Anfossi D., Bacci P., Longhetto A., 1976. Forecasting of Vertical Temperature Profiles in the Atmosphere during Nocturnal Radiation Inversions from Air Temperature Trend at Screen Height, *Quart. J.R.Met.Soc.*, **102**, 173–180
- Aray S.P., 1988. Introduction to Micrometeorology, Academic Press, INC, London, 293
- Grisogono B., 1990. A Mathematical Note on the Slow Diffusive Character of the Long-wave Radiative Transfer in the Stable Atmospheric Nocturnal Boundary Layer, *Boundary-Layer Meteorol.*, **52**, 221–225



- Grisogono B., Keislar R. E., 1992. Radiative Destabilization of the Nocturnal Stable Atmospheric Boundary Layer over the Desert, *Boundary-Layer Meteorol.*, **61**, 1-12
- Kuo H.L., 1968. The Thermal Interaction between the Atmosphere and the Earth and Propagation of Diurnal Temperature Waves, *J.Atmos.Sci.*, **25**, 682-705
- Maksić B., Šikić M., Penzar I., Knežević M., 1962. Klimatske i agroklimatske osobine južnog kalničkog prigorja, Zagreb
- Marki A., 1990. Simulacija visine konvektivnog graničnog sloja, Geofizički zavod, Zagreb, diplomski rad
- Panofsky H.A., Dutton J.A., 1984. A Atmospheric Turbulence, J.Wiley & Sons, New York, 335
- Pasquill F. and Smith F.B., 1983. Atmospheric Diffusion, London, Ellis Horwood Limited, 437
- Penzar I. i B., 1985. Agroklimatologija, Školska knjiga, Zagreb, 274
- Penzar I. i B., 1991. Satne vrijednosti dozračene Sunčeve energije pri uvjetima vedrog neba, *Geofizika*, Vol. **8**
- Penzar I., 1956. Mikroklimatološka istraživanja Geofizičkog instituta u kotaru Križevci 1953, Zagreb
- Stull R.B., 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 666
- Sutton O.G., 1953. Micrometeorology, New York, McGraw-Hill, 333