

# ИНТЕНЗИВНО ПРОВЕТРАВАЊЕ ЗГРАДЕ ЛЕТИ РАДИ ДНЕВНЕ УШТЕДЕ ЕНЕРГИЈЕ ПОТРЕБНЕ ЗА ЊЕНУ КЛИМАТИЗАЦИЈУ

INTENSIVE BUILDING VENTILATION IN THE SUMMER IN ORDER TO SAVE ENERGY NEEDED FOR ITS AIR CONDITIONING

*Проф. др Милорад Бојић, дијл. инж., и  
мр Небојша Лукић, дијл. инж.,  
Машински факултет, Крагујевац*

*У раду се коришћењем формираног софтвера за симулацију понашања динамичког модела зграде, облика паралелоипеда, испитује утицај интензивног ноћног проветравања на дневну потрошњу енергије за климатизацију просторија. Динамички модел зграде је базиран на таласној теорији провођења топлоте, а спољашњи утицаји су узети преко синусоидне промене спољне температуре.*

*Software for simulation of a building heat behaviour using the building heat dynamic model was employed to investigate influence of the night ventilation intensity on daily consumption for air conditioning of the rooms. The building heat dynamic model is based on the heat conduction wave theory and outside influences are taken by sinusoidal outside temperature change.*

**Кључне речи:** проветравање; зграда; уштеда енергије; климатизација; софтвер за симулацију понашања зграде

**Key words:** ventilaton; building; energy saving; air conditioning; software for building behaviour simulation

## 1. Увод

Проблем ограничености резерви фосилних горива и још нерешено питање њихове дугорочне замене, указује на потребу свеобухватне уштеде енергије. Обим потрошње енергије која се користи за загревање или хлађење стамбених зграда, упућује истраживаче који се баве овом материјом на све дубље и прецизније анализе, у циљу изналажења исплативих начина уштеда енергије.

Методе прорачуна потрошње енергије потребне за климатизацију унутрашњости зграда, развијале су се још од стандардне методе вредности "к" (кофицијент пролаза топлоте кроз омотач зграде), преко степен-дана, BRE (Building Research Establishment), методе бин (метода одступања), методе адмитансе, методе линеарног програмирања (види [1] и [2]), све до метода прорачуна "из часа у час". Примену методе прорачуна "из часа у час", омогућио је пре свега нагли развој рачунара и пратеће опреме. Метода прати дневне (често нагле) промене температуре и других утицајних

величина, околине и унутрашњости зграде, што омогућује брзе одговоре климатизационих система и значајну уштеду енергије.

Једна од могућности дневне уштеде енергије потребне за климатизацију стамбених, а нарочито пословних просторија у летњем периоду је ноћно, интензивно, проветравање ових просторија. Расхлађивањем масе омотача зграде (акумулацијом "хладноће"), постиже се мања потрошња (најчешће електричне) енергије потребне за рад климатизера.

Свакако да могућа уштеда енергије, добијена на описани начин, зависи од великог броја фактора, спољашњих (температура, влажност, струјање ваздуха и др.), односно унутрашњих (пре свега термичке карактеристике омотача зграде).

У овом раду се коришћењем софтвера DZID5, формираног на бази динамичког модела зграде и таласне теорије простирања топлоте (основе су изложене у одељку 2), испитују утицаји ноћног проветравања зграде на уштеду енергије за климатизацију. Софтвер је развијен на Машинском факултету у Крагујевцу, на Катедри за термодинамику и термотехнику. Рађен је у програмском језику С, према моделу комерцијалних софтвера (кориснички мени, коришћење миша, графика високе резолуције).

## 2. Математички модел зграде

### 2.1. Механизам провођења топлоте

Теорија простирања топлоте кроз омотач (зидове) зграде, као основа модела, прихваћена је из [3] и [4]. То је таласна теорија која је данас широко прихваћена и за случај линијског провођења топлоте кроз хомогени зид, може се представити на изложени начин.

Уколико се омотач зграде подели на одређени број слојева, количина топлоте  $Q(J)$  коју слој прими за неко време, биће:

$$Q = m \cdot (T_2 - T_1), \quad (1)$$

где су:

$m$  – маса посматраног слоја омотача (kg),

$c$  – специфична топлота посматраног слоја омотача (J/kgK),

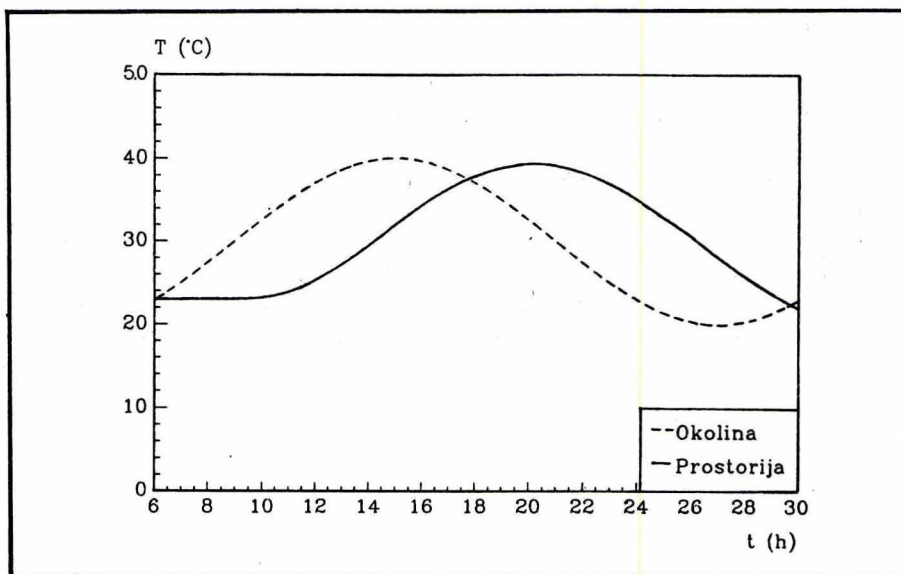
$T_1$  – првобитна температура посматраног слоја омотача (K),

$T_2$  – измењена температура посматраног слоја омотача (K).

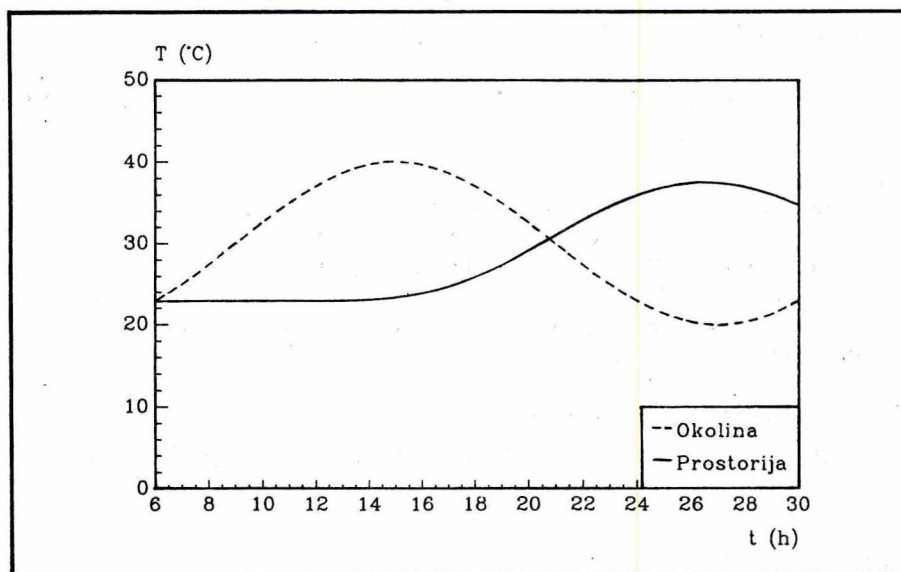
Са друге стране, количина топлоте  $Q$  је једнака разлици количине топлоте која је доведена посматраном слоју  $Q_u(J)$  и оне која је одведена од истог слоја  $Q_i(J)$ . Ако се процес посматра у одређеном временском интервалу  $\delta t(s)$ , биће:

$$\frac{m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)}{\delta t} = \frac{Q_u - Q_i}{\delta t} \quad (2)$$

Количина топлоте  $Q$ , зависи од термичког отпора посматраног слоја омотача и може се представити као:



Слика 1. Утицај њермички "лаког" омошача зграде на унушраињу њемшераиуру ( $\delta_2 = 0,08 \text{ m}$ )



Слика 2. Утицај њермички "средњег" омошача зграде на унушраињу њемшераиуру ( $\delta_2 = 0,12 \text{ m}$ )



$$\frac{m \cdot c \cdot dT}{dt} = \frac{T_1 - T_0}{R} \quad (3)$$

где су:  $dT/dt$  – брзина промене температуре у слоју омотача зграде (K/s);  $R$  – термички отпор слоја, функција дебљине слоја  $\delta$ (m) и његове топлотне проводљивости  $\lambda$ (W/mK); уколико се ради о граничном слоју, онда и одговарајућег коефицијента прелаза топлоте  $h$ (W/m<sup>2</sup>K), (m<sup>2</sup> K/W);  $T_0$  – температура суседног слоја или ваздуха (уколико је посматрани слој гранични) (K).

Температура у посматраном слоју омотача зграде се мења и после истека изабраног (малог) временског интервала она је:

$$T_{(1+\delta t)} = T_1 \frac{dT}{dt} \cdot \delta t \quad (4)$$

Однос  $dT/dt$  се израчунава из једначине (3).

## 2.2. Промена спољне температуре

Промена спољне температуре може бити задата у дискретним вредностима (динамички модел дискретних вредности), континуално према одређеној математичкој функцији (динамички модел фактора одзива), или континуално према одређеној хармонијској функцији (динамички хармонијски модел).

Конкретно, у овом моделу, промена спољне ваздушне температуре је узета као хармонијска, синусна, функција, и то:

$$T_0 = A \cdot \sin\left(\tau \cdot \frac{\pi}{12} + 5 \cdot \frac{\pi}{4}\right) + B \quad (5)$$

где су:

$T_0$  – спољашња температура ваздуха (°C),

$A$  – дневна амплитуда спољашње температуре (°C),

$B$  – дневна магнитуда спољашње температуре (°C),

$\tau$  – текуће време (h).

Као што се из једначине (5) види, усвојено је да највиша дневна температура буде у 15 h, а најнижа у 03 h.

## 2.3. Инфилтрација и проветравање

Размена топлоте услед инфилтрације је узета у обзир преко израза:

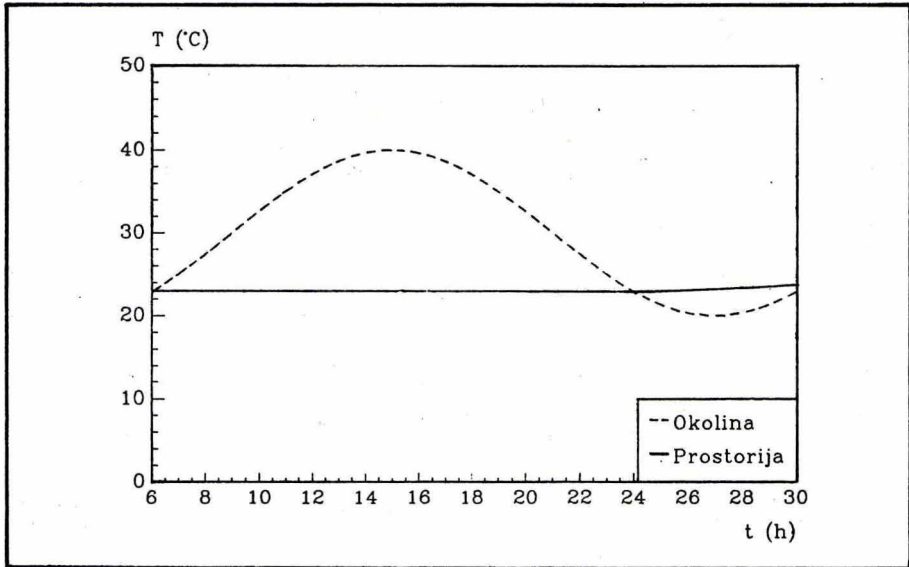
$$Q_{inf} = b \cdot (T_s - T_0), \quad (6)$$

где су:

$Q_{inf}$  – топлотна снага која је преко инфилтрираног ваздуха предата ваздуху у згради (W);

$b$  – инфилтрација по јединици температурске разлике, величина (усво-

јена ради упрошћења процеса инфилтрације) зависна од пропустљивости и дужине процеса прозора и врата, као и од карактеристика просторије и зграде (положај, ветровитост околине итд.) (W/K);  
 $T_s$  – температура ваздуха у унутрашњости зграде (°C).



Слика 3. Утицај термички "тепског" омотача зграде на унутрашњу температуру (δ2 = 0,2 m, црва 24 h)

Што се тиче проветравања, усвојено је да се у току овог процеса унутрашња температура изједначава са спољашњом, при чему се претпоставља да се коефицијент прелаза топлоте са унутрашњег ваздуха на зид удвостручава.

#### 2.4. Климатизација

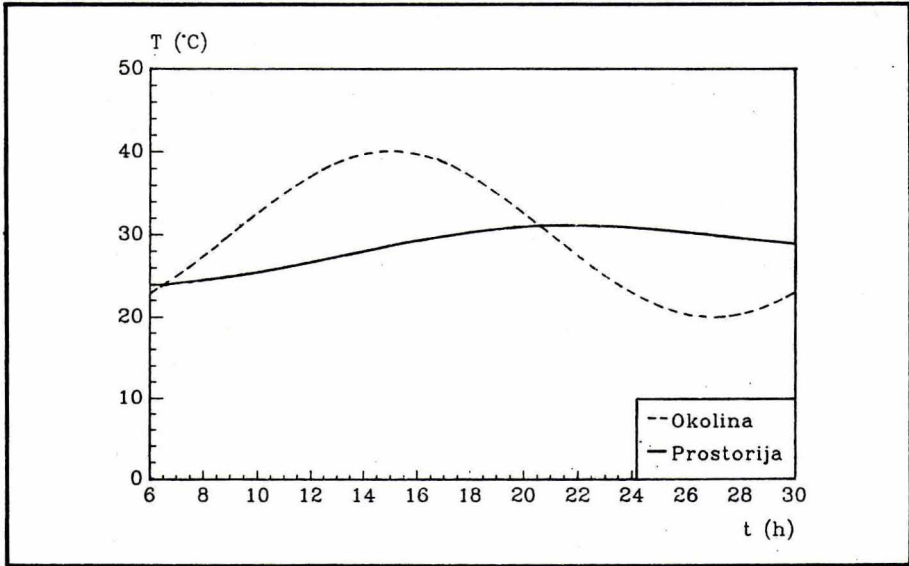
Унутрашњост омотача зграде се климатизује (греје или хлади) константном снагом, све до достизања жељене, контролисане температуре. Систем се даље укључује, односно искључује по достизању дозвољених одступања од задате температуре у просторији.

### 3. Резултати симулације понашања зграде при интензивном проветравању

#### 3.1. Полазни подаци

Потребне симулације су спроведене на моделу зграде облика паралелоипеда, са једном просторијом. Програм омогућава да омотач

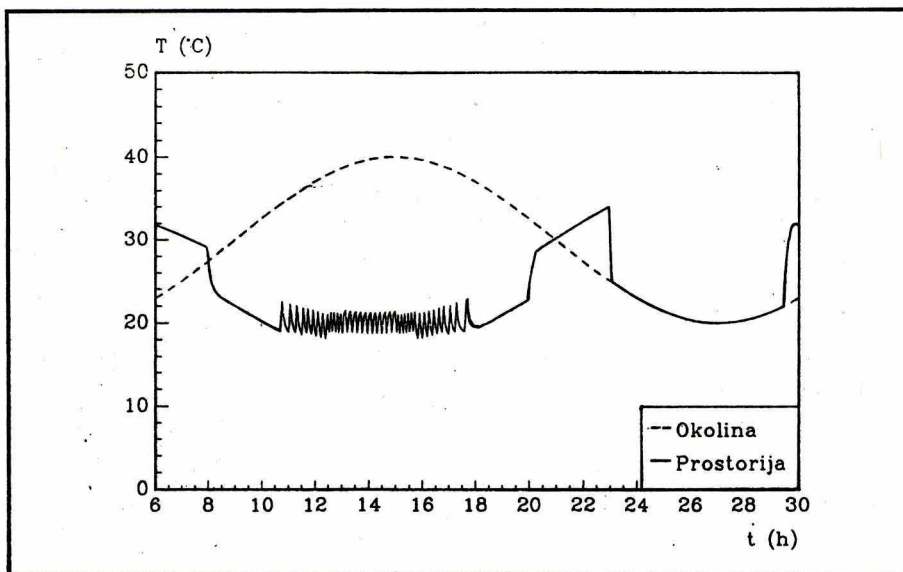
зграде садржи до пет слојева различитих физичких својстава (цигла, бетон, изолација,...). Омотач зграде се дели на прорачунске елементе одређене масе и специфичну топлоту према једначини (1).



Слика 4. Ушњај њермички "њешкоњ" омотача зњраде на унутрашњу њемњрајњу ( $\delta_2 = 0,2 \text{ m}$ ,  $\text{друња } 24 \text{ h}$ )

Подаци за полазни модел су:

- број физичких слојева омотача  $N_s = 3$ ,
- број прорачунских слојева омотача  $N_P = 20$ ,
- временски, прорачунски, интервал  $\delta t = 0,061 \text{ h}$ ,
- запремина просторије  $V_s = 50 \text{ m}^3$ ,
- коефицијент прелаза топлоте околина-зид  $h_1 = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,
- коефицијент прелаза топлоте зид-просторија  $h_2 = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,
- дебљина првог (малтер)  $\delta_1 = 0,02 \text{ m}$ , другог (цигла)  $\delta_2 = 0,12 \text{ m}$  и трећег слоја зида (малтер)  $\delta_3 = 0,02 \text{ m}$ ,
- густина првог (малтер)  $\rho_1 = 1600 \text{ kg/m}^3$ , другог (цигла)  $\rho_2 = 1800 \text{ kg/m}^3$  и трећег слоја зида (малтер)  $\rho_3 = 1600 \text{ kg/m}^3$ ,
- топлотна проводљивост првог (малтер)  $\lambda_1 = 0,7 \text{ W/mK}$ , другог (цигла)  $\lambda_2 = 0,52 \text{ W/mK}$  и трећег слоја зида (малтер)  $\lambda_3 = 0,7 \text{ W/mK}$ ,
- специфична топлота првог (малтер)  $c_1 = 840 \text{ J/kgK}$ , другог (цигла)  $c_2 = 840 \text{ J/kgK}$  и трећег слоја зида (малтер)  $c_3 = 840 \text{ J/kgK}$ ,
- густина ваздуха  $\rho_v = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ,
- специфична топлота ваздуха  $c_v = 1105 \text{ J/kgK}$ ,
- дневна магнитуда спољне температуре  $B = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- дневна амплитуда спољне температуре  $A = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,



Слика 5. Промена унутрашње температуре климатизоване и ноћно проветравање просторије ( $P_k = -3 \text{ kW}$ ,  $t_{kr} = 0,8 \text{ h}$ ,  $t_{kk} = 20 \text{ h}$ )

- инфилтрација по једном келвину  $b = 6,5 \text{ W/K}$ ,
- топлотна снага климатизације ваздуха у просторији  $P_k = -3 \text{ kW}$ ,
- почетак климатизације  $t_{kr} = 7 \text{ h}$ ,
- завршетак климатизације  $t_{kk} = 14 \text{ h}$ ,
- почетак интензивног проветравања  $t_{rp} = 23 \text{ h}$ ,
- завршетак интензивног проветравања  $t_{rk} = 6 \text{ h}$ ,
- контролисана температура у просторији  $T_k = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ .

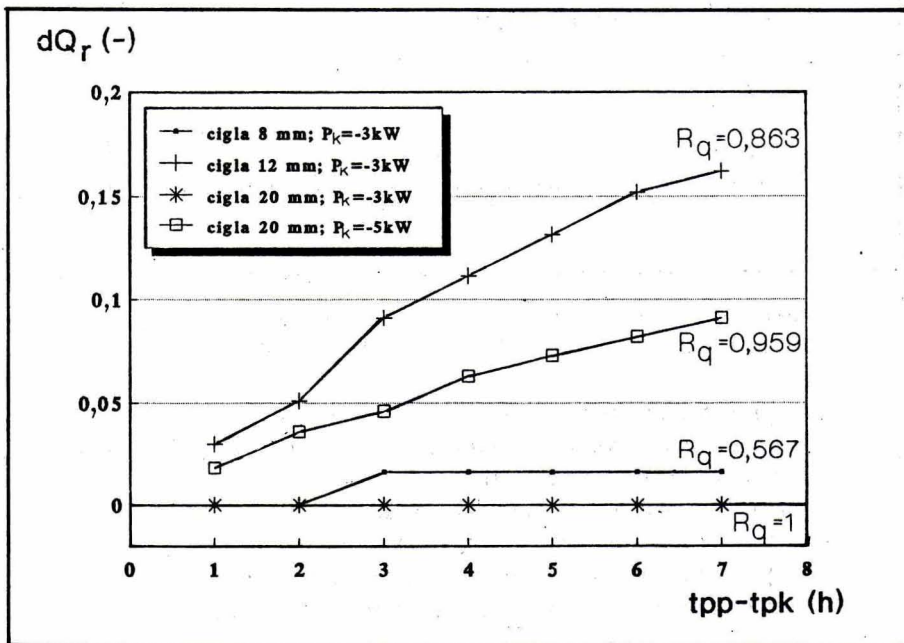
### 3.2. Термички "лаки", "средњи" и "тешки" омотач

Слике 1, 2, 3 и 4 су добијене за пролазни модел зграде (подаци из 3.1), без процеса климатизације и ноћног проветравања просторије. Дијаграм приказан на слици 1 добијен је за дебљину цигле у омотачу од  $\delta_2 = 0,08 \text{ m}$ , дијаграм на слици 2 за дебљину цигле од  $\delta_2 = 0,12 \text{ m}$  (полазни модел), и дијаграми на сликама 3 и 4 за дебљину цигле од  $\delta_2 = 0,2 \text{ m}$ . Слика 3 представља прва 24 часа, а слика 4 следећа 24 часа промене температуре околине и просторије са истим омотачем.

Посматрајући слику 1 можемо закључити да се температурски талас околине врло брзо појављује и у просторији и то својом готово идентичном амплитудом. Мала дебљина омотача зграде, а самим тим и његов мали топлотни капацитет, узрокују мало кашњење промене температуре у просторији за променом температуре околине. Овакав омотач зграде називамо термички "лаким".



На слици 2 се види да је кашњење промене температуре у просторији, у односу на околину, знатно и да се максимална температура у просторији достиже тек у касним вечерњим часовима (26 h на дијаграму је 02 h следећег дана) и то на приметно нижем нивоу. Разлика температура околине и просторије, а самим тим и унутрашњих слојева омотача, највећа је у вечерњим часовима, што овакав омотач зграде чини погодним за ноћно проветравање. Наравно, то не значи аутоматски и да ће постигнуте уштеде бити исплативе. Овакав омотач бисмо назвали термички "лако-тешким" ("средњим").



Слика 6. Релативна уштеда енергије у функцији дужине ноћног проветравања

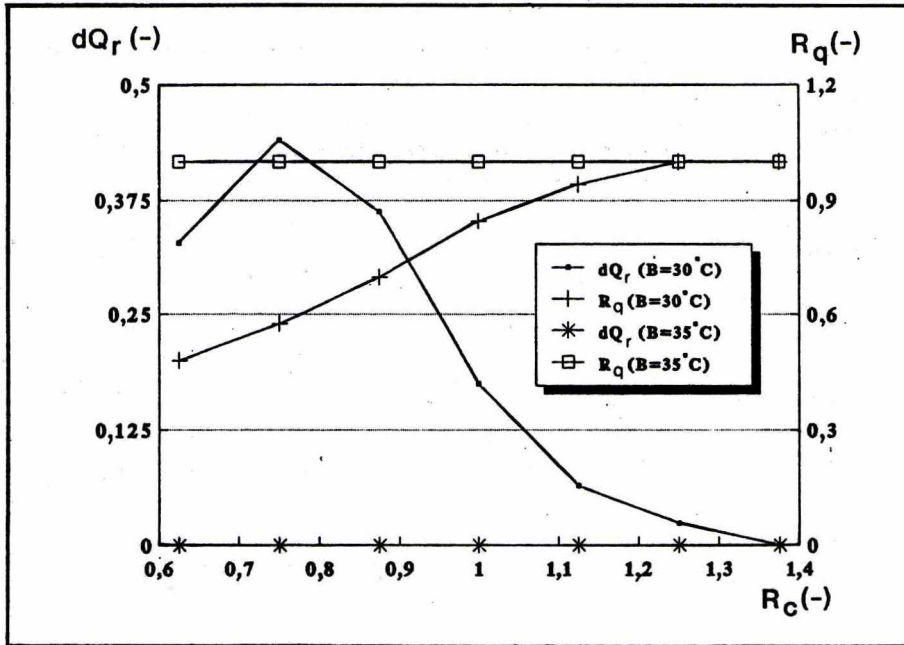
Слике 3 и 4 приказују понашање термички "тешког" омотача при промени спољне температуре. Максимум температуре у просторији и унутрашњим слојевима зида догађа се тек наредног дана и то са знатно нижом вредношћу у односу на околину. Овај омотач има велики топлотни капацитет и "неосвојив" је на спољну промену температуре.

### 3.3. Климатизација и ноћно проветравање

Слика 5 приказује климатизацију у времену од 08 h до 20 h и ноћно проветравање у згради (полазни модел,  $\delta_2 = 0,12$  m). По достизању контролисаних температура, климатизер се наизменично искључује и укључује.



Негде при крају радног времена климатизера, његова топлотна снага ( $P_k = -3 \text{ kW}$ ) постаје недовољна за одржавање задате температуре у просторији (температурски талас стиже до унутрашњих слојева зида и просторије) и он ради непрекидно док температура у просторији расте.



Слика 7. Релативна уштеда енергије у функцији специфичне шпоилоше ( $B = 35^\circ C$ ,  $B = 30^\circ C$ )

Следи интензивно ноћно проветравање, које свој учинак треба да покаже наредног дана.

### 3.4. Релативна уштеда енергије у функцији дужине ноћног проветравања

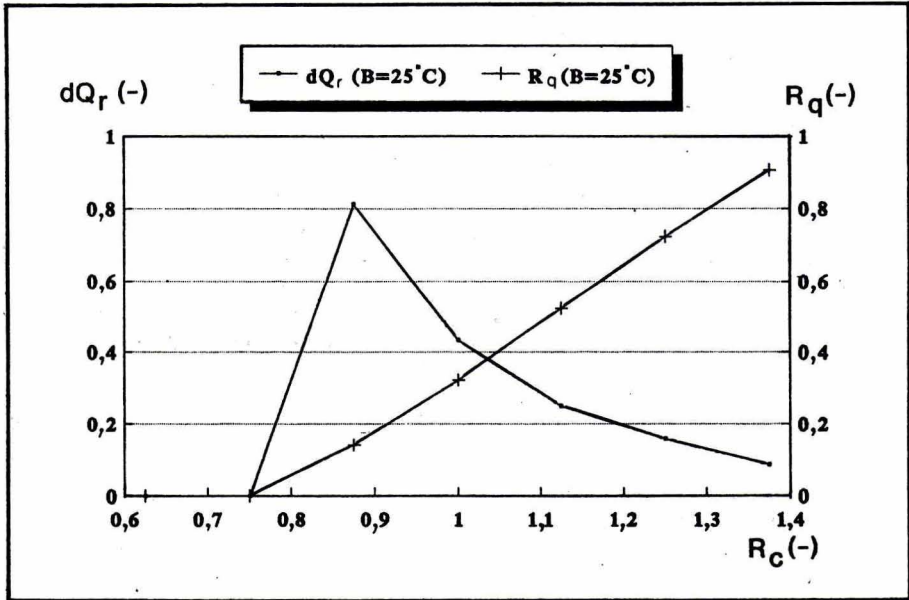
За праћење уштеде енергије при интензивном проветравању, уведена је величина  $dQ_r$  (-), као релативна уштеда енергије. Она се добија из:

$$dQ_r = \frac{Q_k - Q_{kp}}{Q_k}, \quad (7)$$

где су:

$Q_k$  – укупно одведена топлотна енергија из просторије, помоћу климатизера (kWh),

$Q_{кр}$  – укупно одведена топлотна енергија из просторије, помоћу климатизера, а при коришћењу интензивног ноћног проветравања (ово није утрошена електрична енергија; да би се она добила треба  $Q_{кр}$  поделити фактором хлађења климатизера, уколико ради у компресионом расхладном циклусу) (kWh).



Слика 8. Релативна уштеда енергије у функцији специфичне топлоте ( $B = 25^\circ C$ )

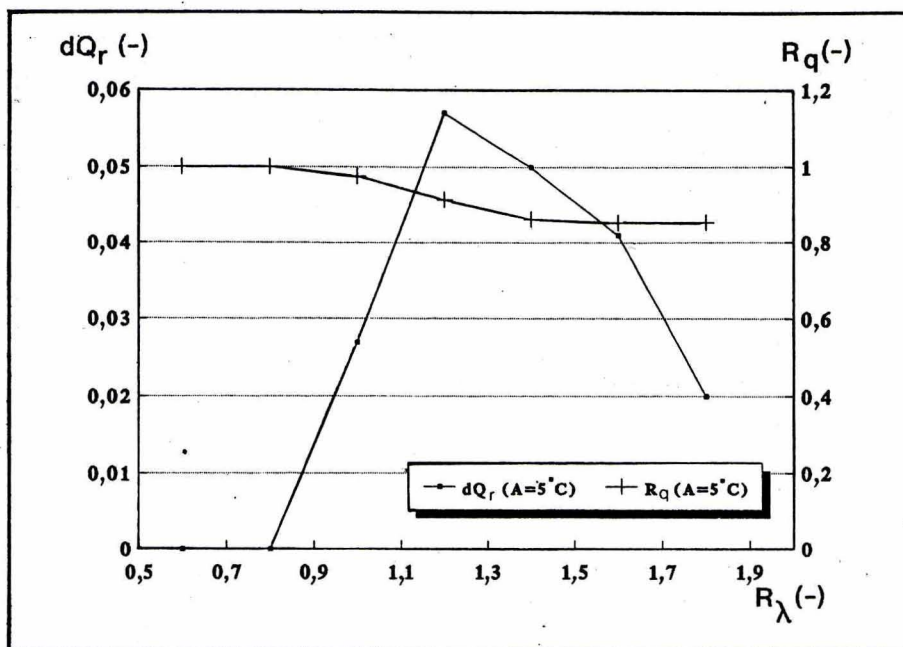
Уведене су и следеће бездимензијске величине:

$$R_q = \frac{Q_k}{Q_{kmax}}; \quad R_\lambda = \frac{\lambda}{0,5}; \quad R_c = \frac{c}{800}, \quad (8)$$

где су:

- $R_q$  – релативна одведена топлотна енергија помоћу климатизера, у односу на максимално могућу  $Q_{kmax}$  (kWh) (климатизер непрекидно ради све време климатизације (-),
- $R_\lambda$  – релативна топлотна проводљивост средњег слоја омотача зграде, у односу на топлотну проводљивост од 0,5 W/mK (цигла) (-),
- $R_c$  – релативна специфична топлота средњег слоја омотача зграде, у односу на специфичну топлоту од 800 J/kgK (цигла) (-).

На слици 6 је приказана зависност релативне уштеде енергије  $dQ_r$  од дужине трајања ноћног проветравања трп-трк, за термички "лаки", "средњи" и "тешки" омотач зграде.



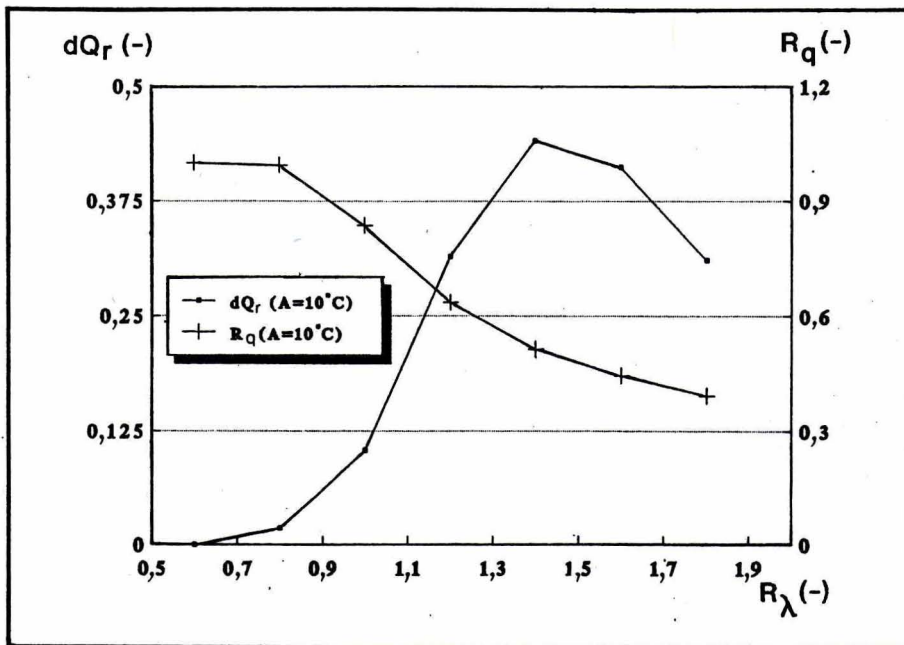
Слика 9. Релативна уштеда енергије у функцији специфичне топлоте  
( $A = 5^\circ C, P_k = -4 kW$ )

Са дужим трајањем ноћног проветравања, уштеда енергије расте; она је највећа за "средњи" омотач зграде (за овај омотач зграде, а за време проветравања, јавља се највећа разлика између текуће спољне и унутрашње температуре; слика 2), занемарљива за "лаки" омотач (у време ноћног проветравања, унутрашњи слојеви зида су хладни, као и температура у просторији; слика 2) док је за "тешки" омотач једнака нули. За "тешки" омотач зграде при датим условима снага климатизације од  $P_k = -3 kW$  је недовољна за постизање задате, контролисане температуре у просторији  $T_k$ , па систем ради непрекидно. Проветравањем се унутрашњи слојеви омотача хладе, али недовољно, да се климатизацијом постигне задата температура, па тако нема ни уштеда.

У случају повећања снаге климатизације на  $-5 kW$ , систем је у стању да достигне задату температуру у просторији и самим тим искористи акумулацију "хладноће" у зидовима остварену ноћним проветравањем. Иако је уштеда по својој апсолутној вредности (што се директно на дијаграму не види) већа за "тешки" омотач, за "средњи" омотач је знатно већа релативна уштеда енергије.

### 3.5. Релативна уштеда енергије у функцији специфичне топлоте

На сликама 7 и 8 је приказана зависност релативне уштеде енергије  $dQ_r$  и релативне потрошње енергије  $R_q$  од релативне специфичне топлоте, за три различите дневне магнитуде спољне температуре.



Слика 10. Релативна уштеда енергије у функцији топлотне проводљивости ( $\Delta = 10^\circ\text{C}$ ,  $P_k = -4 \text{ kW}$ )

За високу магнитуду (средњу вредност) температуре од  $35^\circ\text{C}$ , систем не постиже задату температуру, ради непрекидно, а уштеде енергије за климатизацију у овом случају нема. За средњу и ниску магнитуду уштеде енергије постоје. После остварене максималне вредности, оне опадају како расте топлотни капацитет омотача, пошто се повећава могућност акумулације спољне топлотне енергије, а фаза промена унутрашње температуре постаје неповољнија за извођење поћног проветравања. Највећа релативна уштеда се постиже за најнижу магнитуду спољне температуре, када је најнижа и потрошња енергије за климатизацију.

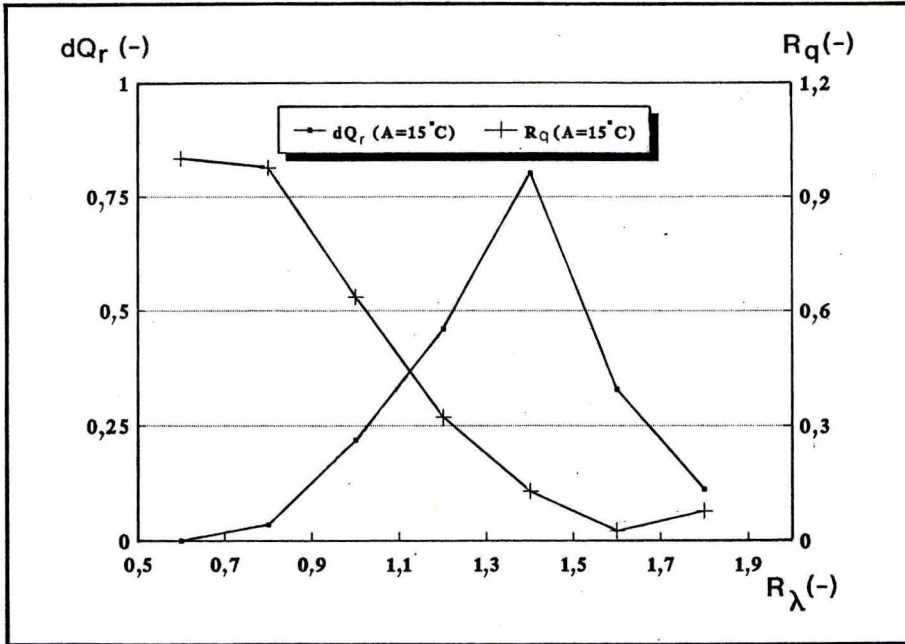
### 3.6. Релативна уштеда енергије у функцији топлотне проводљивости

На сликама 9, 10 и 11 приказана је зависност релативне уштеде енергије  $dQ_r$  и релативне потрошње енергије од релативне топлотне проводљивости, за три различите дневне амплитуде спољне температуре (снага климатизације је различита од снаге полазног модела и износи  $P_k = -4 \text{ kW}$  за све три слике).

Са растом топлотне проводљивости, смањује се потрошња енергије потребне за климатизацију (климатизер веома брзо охлади унутрашње слојеве омотача зграде и потрошња пада). Релативна уштеда енергије, коришћењем поћног проветравања, има свој јасни максимум. Лево од тог



максимума омотач се понаша као изолатор и поћна "хладноћа" се тешко акумулира у слојевима зида. Десно од минимума омотач се понаша као топлотни проводник и "хладноћа" бежи кроз његове слојеве. За највеће амплитуде спољне температуре и уштеде су највеће, што је лако разумљиво.



Слика 11. Релативна уштеда енергије у функцији топлотне проводљивости ( $A = 15^\circ C, P_k = -4 kW$ )

#### 4. Закључак

Симулацијом динамичког понашања зграде, добијени су извесни резултати, чији је један део изложен у овом раду. Колико су они блиски стварности, питање је на које ће одговорити даље испитивање модела.

Само у одређеним условима, ноћно проветравање зграде може бити економски исплативо (у раду није разматрана енергија која се троши на проветравање, односно енергија за погон вентилатора, као ни питање влажности ваздуха и сунчевог зрачења). Очигледно је да постоји неки оптимални омотач зграде који за дате промене спољних услова даје минималну потрошњу енергије, захваљујући ноћном проветравању. Сигурно је да ће се разликовати физичка својства оптималног омотача зграде у летњем периоду са коришћењем ноћног проветравања и без њега. Ноћно проветравање је увек применљивије у пословним него у стамбеним објектима.

## 5. Литература

- [1] **Spielvogel, L.:** *Building Envelope, Energy Management Handbook*, from Turner, W., John Wiley and Sons, 1982.
- [2] **Bojić, M., Lukić N., Trnobrasky K.:** *Linear Programing Applied to an Industrial Building with Several Available Hot Refuse Flows*, Energy, The International Journal, 20/10, 1995, pp. 1067-1074.
- [3] **Oziks, M. N., Tzou D. Y.:** *On the Wave Theory in Heat Conduction*, Journal Heat Transfer, 116/3, (1994), pp. 526-535.
- [4] **Holmes, M. J.:** *What's a Dynamic Thermal Model*, Building Service, March, 1986.