

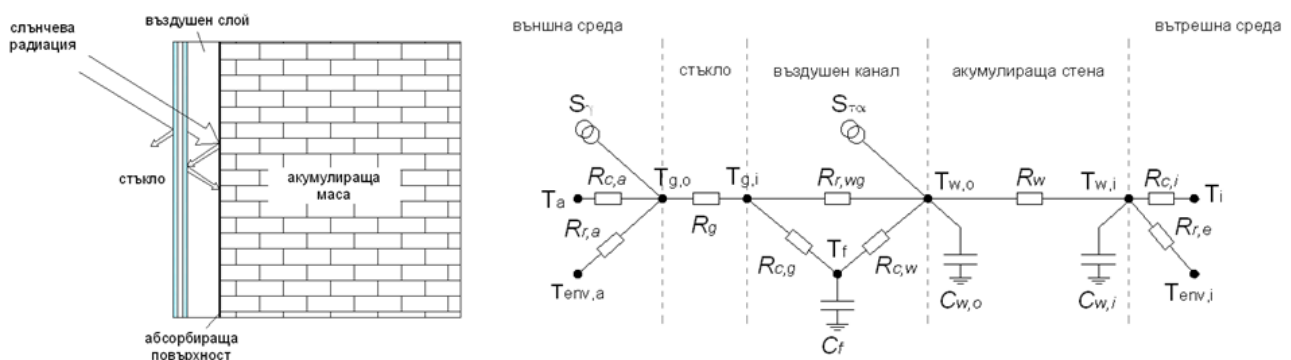
## Модели на топлопреносните процеси в невентилируема стена на Тромб

Борислав Станков, Никола Калоянов

Разгледани са принципа на действие и основните топлопреносни процеси в невентилируема стена на Тромб и са разгледани някои от най-известните динамични и квазистационарни модели на този тип пасивен слънчев елемент. Направена е оценка на сложността и приложимостта на тези модели, като акцентът е поставен върху квазистационарните модели. Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София - 2011 г. и от проект на ФНИ "Създаване на Университетски научно-изследователски комплекс (УНИК) за иновации и трансфер на знания в областта на микро/нано технологии и материали, енергийната ефективност и виртуалното инженерство" - договор ДУНК-01/3/2009.

### Увод

Стена на Тромб обикновено се изгражда като част от южната фасада на дадена сграда с цел максимално оползотворяване на слънчевата енергия попадаща върху сградата през деня. Съществуват няколко конфигурации на стена на Тромб: вентилируема, невентилируема и композитна. Невентилируемата стена на Тромб се състои от масивна стена, стъкло и въздушен канал между тях (фиг.1). На фиг.1 е показана принципна схема на топлопреносните процеси в невентилируема стена на Тромб под формата на система от резистивни (съпротивителни) и капацитивни (акумулиращи) елементи, и токови (топлинни) източници по подобие на електро-диаграма.



Фиг.1. Невентилируема стена на Тромб

На фиг.1 е показана принципна схема на топлопреносните процеси в невентилируема стена на Тромб под формата на система от резистивни (съпротивителни) и капацитивни (акумулиращи) елементи, и токови (топлинни) източници по подобие на електро-диаграма. Съпротивителните елементи представляват съпротивленията на топлопроводност в стъклото и в стената ( $R_g, R_w$ ) и съпротивленията на конвективен и радиационен топлообмен към помещението ( $R_{c,i}, R_{r,i}$ ), към външната среда ( $R_{c,a}, R_{r,a}$ ) и във въздушния канал ( $R_{c,g}, R_{c,w}, R_{r,wg}$ ). Токовете източници ( $S_\gamma, S_{\tau\alpha}$ ) представляват потоците от слънчева радиация попадаща върху стъклото и върху абсорбиращата повърхност, а капацитивните елементи ( $C_{w,o}, C_{w,i}, C_f$ ) представляват акумулиращата способност масивната стена и на въздуха в канала. Възловите точки в диаграмата са усреднените температури на външния въздух ( $T_a$ ),

на външната и вътрешната повърхност на стъклото ( $T_{g,o}, T_{g,i}$ ), на въздуха в канала ( $T_f$ ), на външната и вътрешната повърхност на масивната стена ( $T_{w,o}, T_{w,i}$ ), на въздуха в помещението ( $T_i$ ), както и небесната температура ( $T_{env,a}$ ) и температурата на ограждащите елементи в помещението ( $T_{env,i}$ ).

Стената служи като акумулираща топлинна маса, а стъклото и въздушния канал изпълняват ролята на топлинен изолатор. Стъклото, което може да представлява единичен, двоен или троен стъклопакет и служи като едноразочен филтър, пропускащ късовълновата слънчева радиация да достигне до масивната стена, без да пропуска радиацията с голяма дължина на вълната излъчвана от повърхността на загрялата стена навън, като по този начин задържа топлината в системата. Част от слънчевата радиация, която достига до стъклото през деня преминава през него (60-90% в зависимост от вида му [9]) и се абсорбира от повърхността на масивната стена. Процесът на топлинна дифузия в стената протича бавно и вследствие на това топлината достига до вътрешната среда със закъснение от няколко часа, спрямо момента в който е била абсорбирана от попадналата върху абсорбиращата повърхност слънчева енергия. По този начин топлината акумулирана в стената през най-топлата част от деня се отдава в помещението през по-студените части от денонощието и това позволява намаляване на разходите за отопление на сградата.

Невентилируемата конфигурация на стена на Тромб има приложение като стратегия за пасивно слънчево отопление, като за да се избегне негативният ефект, който подобна система би имала през летния период и като стратегия за регулиране, се предвиждат регулируеми и нерегулируеми системи за засенчване. Поради по-простата конструкция, полесното регулиране и някои проблеми свързани със замърсяването на стъклото при вентилируемите модификации, невентилируемата стена на Тромб в много случаи е предпочитаният вариант. В тази статия са разгледани само модели на топлопреносните процеси за невентилируема стена на Тромб и по-долу под стена на Тромб следва да се подразбира невентилируемата конфигурация.

### **Експериментални изследвания**

В стената на Тромб се получава изразен нестационарен температурен режим, поради което създаването на коректни опростени модели за определянето на енергийните характеристики на този тип пасивен слънчев елемент не е проста задача. Не е приложимо търсенето на аналитично решение за определяне на цялостния топлинен баланс и повечето модели са създадени на базата на емпирични зависимости определени вследствие на експериментални изследвания. Изследвани са както експериментални постановки на стени на Тромб така и реално изградени системи. Два от най-широко публикуваните и подробно изследвани случаи са експерименталните изследвания в лабораторията Лос Аламос, щата Ню Мексико [1][5] и изградената невентилируема стена на Тромб в сградата на туристическия център на националния парк Зион, САЩ [2].

Изследванията за стена на Тромб в Лос Аламос са проведени между 1977 и 1982 г. като част от серия експерименти за различни стратегии за пасивно слънчево отопление. Голямото количество измерени стойности при осъществяването на тези експерименти са послужили за валидиране на модели на стена на Тромб в няколко последващи изследвания от различни автори, например при валидирането на квазистационарният SLR модел [3][5] и динамичните модели въведени в софтуерните продукти DOE-2 и EnergyPlus [1]. На фиг.2 е представена извадка от експерименталните данни получени от измерванията на една от опитните постановки на стена на Тромб с поддържане на постоянна температура на въздуха в помещението [1]. От фигурата се вижда голямото закъснение на пика на температурата както и голямото изменение в амплитудата между външната (абсорбиращата) и вътрешната повърхности на стената на Тромб.



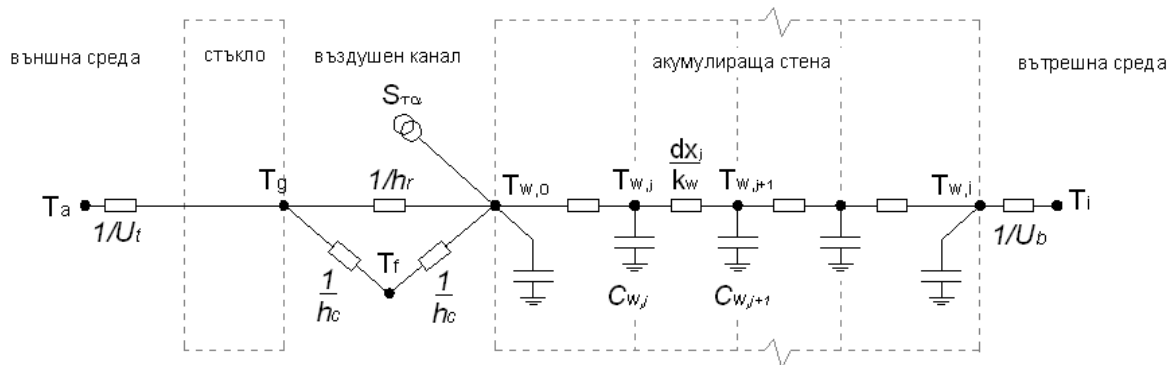
Фиг. 2. Експериментални данни за температурните полета в стена на Тромб

В нискоенергийната сграда в парка Зион е направен подробен анализ на стратегиите за пасивно отопление и охлаждане, включително на енергийните характеристики на стената на Тромб, които представляват ценна информация за параметрите на реално изградена и действаща система. Направен е анализ на температурните полета, показващ влиянието на различни фактори като засенчване, хомогенност на материалите, топлинни мостове и др. Изменението на температурния профил във времето показва, че топлината се придвижва от външната към вътрешната повърхност на стената за около 4 часа. По този начин стената на Тромб има най-голям принос към отоплението на сградата в периода между 5:00 и 7:00 следобед. Друг важен извод от направения анализ е, че топлата вътрешна повърхност на стената на Тромб допринася за топлинния комфорт в сградата като осигурява лъчист топлинен поток към обитателите (температурите на вътрешната повърхност са достигали до 37.7°C в определени периоди от годината) и това осигурява комфорта на обитателите дори при по-ниски температури на въздуха в помещението [2].

Направеният анализ на цялостният баланс на системата за периода 2001-2003 г. показва, че стената на Тромб покрива значителна част от общия отоплителен товар на сградата, като същевременно е представлявала допълнителен топлинен товар само през 2 от общо 151 дни в отоплителния сезон. Средната ефективност на въпросната стена на Тромб (еквивалентна на топлината отдадена от стената на сградата отнесена към пълната слънчева радиация попаднала върху стената) е била около 13% [2].

### Динамични модели

Най-точните и най-сложни модели на стена на Тромб представляват динамичните модели, при които се търси решение на серия аналитични и емпирични зависимости за взаимосвързани балансови точки с малка времева стъпка (обикновено един час). При тези модели най-често се използва методът на крайните разлики за дискретизация на елемента (стената на Тромб), който се разглежда като едномерен обект, като се определят основните балансови (температурни) точки, след което се задават балансови уравнения за всяка от тези точки, които са взаимосвързани помежду си. След като се зададат начални условия, системата се симулира и уравненията се решават за всяка времева стъпка докато не се достигнат критериите за сходимост. Такива модели са въведени в някои от най-разпространените софтуерни продукти за моделиране и симулиране на топлинни системи, като EnergyPlus, DOE-2 и TRNSYS. Схема на модела на стена на Тромб, въведен в софтуера TRNSYS [7], е показана на фиг.3 (по подобие на схемата на фиг.1).



Фиг. 3. Модел на стена на Тромб в софтуера TRNSYS

Пример за различията в някои от емпиричните зависимости използвани в моделите на стена на Тромб в тези софтуерни продукти са уравненията използвани за изчисление на конвективния топлообмен във въздушния канал. Типът на конвекцията във въздушния канал е разглеждан като естествена конвекция в ограничен вертикален канал (ограничено пространство между две вертикални пластини) с голямо съотношение на височината на стената ( $H$ ) към дебелината на въздушния слой ( $L$ ), който е добре изучен за общия случай. В EnergyPlus, DOE-2 и TRNSYS са използвани различни зависимости за определяне на числото на Нуселт като функция от числото на Рейли и отношението на височината на канала към дебелината на въздушния слой. Уравненията въведени в софтуера EnergyPlus са базирани на изразите дадени в ISO 15099:2000 [1]:

$$Nu = \max \left\{ \begin{array}{l} 1 + 1,7596678 \cdot 10^{-10} Ra^{2,2984755} \leftarrow Ra \leq 10^4 \\ 0,028154 Ra^{0,4134} \leftarrow 10^4 < Ra \leq 5 \cdot 10^4 \\ 0,0673838 Ra^{1/3} \leftarrow 5 \cdot 10^4 < Ra \leq 10^6 \end{array} ; 2,242 \left( \frac{Ra}{H/L} \right)^{0,272} \right\} \quad (1)$$

В софтуера TRNSYS е използван друг израз [7]:

$$Nu = 0,01711 Ra^{0,29} \quad (2)$$

Програмите BLAST и DOE-2 използват едни и същи емпирични зависимости базирани на изследвания от 20-те години на миналия век [1]:

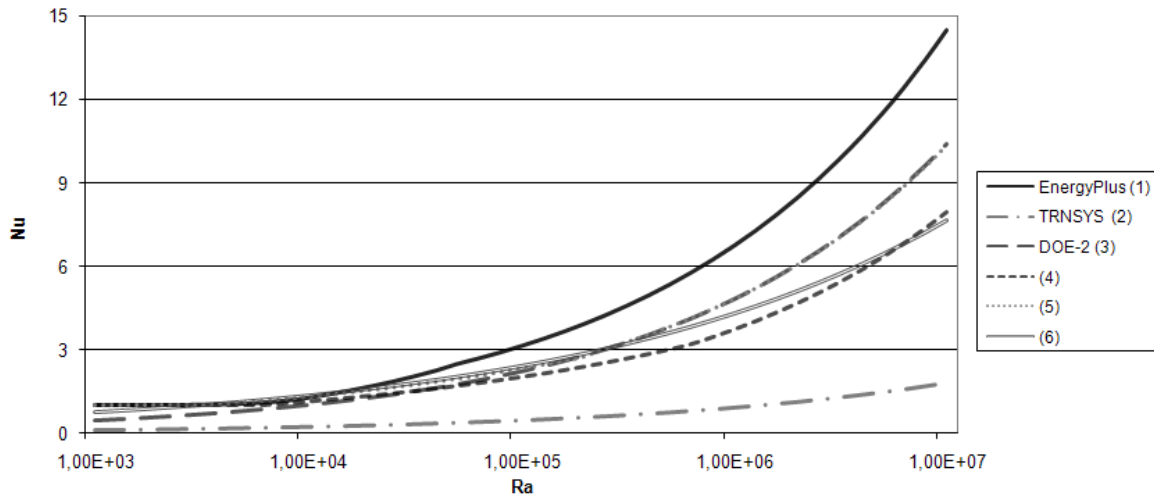
$$Nu = 0,065 \left( \frac{Ra}{Pr} \right)^{1/3} \left( \frac{H}{L} \right)^{-1/9} \quad (3)$$

На фиг.4 е представено сравнение между трите различни модела при приети стойности за числото на Прандтл – 0,7 и съотношение между височина и дебелина на слоя – 42. За допълнително сравнение са приложени и още три израза от различни автори:

$$Nu = \max \left\{ 1; 0,288 \left( \frac{Ra}{H/L} \right)^{0,25} ; 0,039 Ra^{0,33} \right\} \quad (4) [1]$$

$$Nu = \begin{cases} 1 \leftarrow Ra \leq 2 \cdot 10^3 \\ 0,197 Ra^{0,25} (H/L)^{-1/9} \leftarrow Ra \leq 2 \cdot 10^5 \\ 0,073 Ra^{0,3333} (H/L)^{-1/9} \leftarrow Ra \leq 2 \cdot 10^7 \end{cases} \quad (5) [6]$$

$$Nu = 0,42 Ra^{1/4} Pr^{0,012} \left( \frac{H}{L} \right)^{-0,3} \quad (6) [1]$$



Фиг. 4. Сравнение между моделите на конвективен топлообмен във въздушния канал

#### Опростени месечни методи

Поради сложността на динамичните модели тяхното приложение е ограничено и често се търсят по-бързи и лесни методи за определяне на енергийните характеристики на топлинните системи. Един такъв метод е т.нар. SLR метод [3][4][5]. Той е приложим за няколко вида пасивни слънчеви системи (общо 94 варианта), включително различни варианти на стена на Тромб. Базира се на определяне на фракцията (частта) от пълния топлинен товар на сградата, която се покрива от слънчевите печалби през пасивния слънчев елемент, по подобие на f-chart метода [8] използван за активни слънчеви колектори. Основата за определяне на тази фракция са емпирични зависимости определени вследствие от серия симулационни изследвания за различни видове пасивни слънчеви системи проведени чрез софтуера PASOLE и валидирани чрез резултатите от експерименталните изследвания в лабораторията в Лос Аламос. SLR методът е квазистационарен, като изчисленията се правят за всеки месец поотделно и се базират на нетната остъклена площ на стената на Тромб (чистата прозрачна площ след като се премахне площта на рамката и засенчващите елементи). Точността на метода спрямо резултатите от детайлните симулации в софтуера PASOLE е в рамките на +/-3% [3][4][5].

Първата стъпка на SLR методът е определяне на нетния референтен товар на сградата –  $Q_{ns}$  и нетният коефициент на топлинни загуби (BLC), включващ влиянието на топлопреминаване през ограждащите елементи и инфилтрация (7). Нетният товар представлява месечните топлинни загуби на сградата без да се взема предвид стената на Тромб, т.е. тя се разглежда като адиабатна повърхност. Определянето на товара може да стане по произволен метод, като например методът на ден-градусите. Следващата стъпка е определянето на отношението на нетния коефициент на топлинни загуби към нетната остъклена площ на стената на Тромб - LCR (8):

$$BLC = \sum_i U_i A_i + \dot{Q}_{inf} \left[ \frac{W}{K} \right] \quad (7)$$

$$LCR = \frac{BLC}{A_{tp}} \left[ \frac{W/K}{m^2} \right] \quad (8)$$

В основата на метода е намирането на коефициента X, който представлява отношението на количеството слънчева енергия абсорбирана от стената на Тромб към

месечния топлинен товар на сградата. На практика този коефициент се намира от изведена емпирична зависимост като функция от климатичните параметри, коефициента LCR и няколко параметъра, които се определят от таблици в зависимост от типа на елемента. Фракцията от пълния топлинен товар на сградата, която се покрива от слънчевите печалби през пасивния слънчев елемент -  $f_{ns}$  също се определя от емпирични зависимости като функция от  $X$ , LCR и таблични стойности в зависимост от типа на елемента. След определянето на  $f_{ns}$  може да се определи количеството енергия което ще бъде внесено в сградата от слънчеви печалби -  $Q_s$  (9) и допълнителното количество енергия от външни източници, което ще бъде необходимо за поддържане на температурата в сградата -  $Q_{aux}$ :

$$Q_s = f_{ns} Q_{ns} \quad [W.h] \quad (9)$$

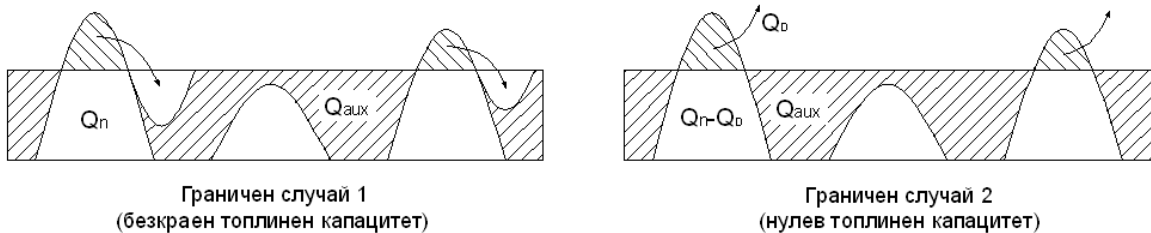
$$Q_{aux} = (1 - f_{ns}) Q_{ns} \quad [W.h] \quad (10)$$

Въз основата на SLR метода, неговите автори са създали и опростен метод на годишна база, при който  $f_{ns}$  се определя директно като функция от LCR от таблици, в зависимост от типа на елемента и местоположението [4][5]. Стойностите в тези таблици са определени вследствие от решаване на емпиричните зависимости на SLR метода при определени условия, като целта е опростеният метод да се използва като първо приближение, когато е необходимо да се направи бърза оценка на възможните икономии от въвеждането на подобна мярка. Опростеният метод е с доста по-ограничено приложение тъй като е валидиран само за определени климатични зони в САЩ.

#### **Метод на неоползотворяемите печалби (UU метод)**

Методът на неоползотворяемите печалби [3][8] по подобие на SLR метода е квазистационарен месечен метод основан на намирането фракцията от пълния топлинен товар на сградата, която се покрива от слънчевите печалби през пасивния слънчев елемент. Един от вариантите на UU метода е приложим за невентилируема стена на Тромб, като според някои литературни източници в същия си вид е в достатъчна степен валиден и за вентилируеми конфигурации [3]. UU методът е намерил приложение за изчисляване на енергийните печалби от стена на Тромб в софтуера F-Chart [8].

UU методът е основан на презумпцията, че стената на Тромб (или цялата сграда, ако се прави анализ на директните слънчеви печалби) може да се разглежда като колектор с ограничен топлинен капацитет (ограничена акумулираща способност) [3]. При този метод се прави анализ на два гранични случая (фиг.5). При първия граничен случай се приема, че стената на Тромб има безкрайна акумулираща способност и всичката топлина, която постъпва в стената вследствие от слънчевото облъчване и не се оползотворява веднага (т.е. когато слънчевите печалби са по-големи от топлинния товар на сградата) се акумулира в стената и се използва в по късен период. Вторият граничен случай е когато се приема, че стената няма акумулираща способност (има нулев топлинен капацитет) и всичката допълнително постъпила топлина се изхвърля в околната среда и не се оползотворява в по-късен период -  $Q_D$ . С други думи в този случай стената на Тромб може да се разглежда като радиационен щит, който променя амплитудата, но не и времето на топлопритоците от слънчева радиация [3]. На практика първият случай представлява идеалният вариант, при който се оползотворява максималното количество абсорбирана от стената слънчева радиация ( $Q_n$ ), а при вторият случай се оползотворява най-малко ( $Q_n - Q_D$ ). При UU методът се определя къде между тези две крайности се намира реалната система.



Фиг.5. Гранични случаи при метода на неоползотворяемите печалби

Топлинният баланс на сградата показващ количеството топлина, което трябва да бъде доставено от други източници, при двата гранични случая е съответно:

$$Q_{aux,\infty} = (Q_{ad} - Q_n)^+ \quad (11)$$

$$Q_{aux,0} = (Q_{ad} - Q_n - Q_D)^+ \quad (12)$$

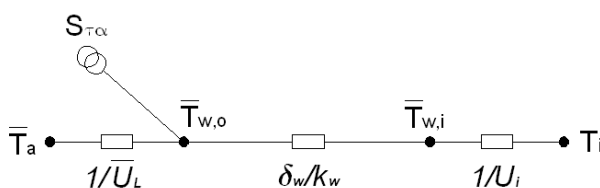
Също както при SLR методът първата стъпка е определяне на нетния топлинен товар на сградата -  $Q_{ad}$  като стената на Тромб се разглежда като адиабатна повърхност. Определят се и топлинните загуби на стената на Тромб при липса на слънчево облъчване, т.е. тези които биха възникнали, ако пропускливостта на стъклото за слънчевата радиация е нула -  $Q_w$ . Отново товарите се определят по произволен метод, като изчисленията се правят по постоянна вътрешна температура (долната температура зададена на термостата). Ако температурата е над тази, допълнителните топлинни загуби се прибавят към  $Q_D$ . Към  $Q_D$  се добавя и топлината, която трябва да бъде изхвърлена, когато температурата превиши горната граница на термостата.

По подобие на SLR методът се дефинират коефициентът  $X$  и фракцията от пълния топлинен товар на сградата, който се покрива от слънчевите печалби  $f$ :

$$X = \frac{\bar{S}_{\tau\alpha} NA_r}{Q_{ad} + Q_w} \quad (13)$$

$$f = 1 - \frac{Q_{aux}}{Q_{ad} + Q_w} \quad (14)$$

Еквивалентната система от съпротивителни и капацитивни елементи показана на фиг.1, при UU методът се опростява до тази показана на фиг.6.



Фиг. 6. Модел на стена на Тромб при UU метода

При изчисленията се използват два коефициента на топлопреминаване: обобщеният коефициент на топлинни загуби на стената на Тромб -  $U_w$  и коефициента на топлопреминаване от абсорбиращата повърхност на стената към помещението -  $U_k$ :

$$U_w = \frac{1}{\frac{1}{U_L} + \frac{1}{U_i} + \frac{\delta_w}{k_w}} \quad (15)$$

$$U_k = \frac{1}{\frac{1}{U_i} + \frac{\delta_w}{k_w}} \quad (16)$$

$U_i$  представлява коефициент на топлопредаване между вътрешната повърхност на стената и вътрешния въздух, а  $U_L$  - усреднен коефициент на топлинни загуби от външната повърхност на акумулиращата стена през стъклото към външната среда (концепцията е същата като при коефициента на топлинни загуби от абсорбера на плосък слънчев колектор)

Нетна месечна топлина влязла в отопляемата сграда през стената на Тромб -  $Q_n$  (17) се намира на базата на презумпцията, че температурният профил по дебелина на стената е линеен – т.е. приема се, че акумулиращият капацитет на стената за целия месечен период е пренебрежимо малък спрямо пълния топлинен поток през нея за същия период (обикновено акумулиращият капацитет е по-малък от топлинния товар на сградата за един ден) [3]:

$$Q_n = U_k A_r (\bar{T}_{w,o} - T_i) \Delta t \cdot N \quad (17)$$

Месечният баланс на външната повърхност на стената (абсорбиращата повърхност) (18) показва как абсорбираната енергия се разпределя като загуби към околната среда и дифузия в стената с последващ топлообмен към вътрешната среда

$$\bar{S}_{\tau\alpha} = U_k (\bar{T}_{w,o} - T_i) \Delta t + \bar{U}_L (\bar{T}_{w,o} - \bar{T}_a) \Delta t \quad (18)$$

Където  $\Delta t$  – брой времеви единици на ден (ч).

От балансовото уравнение се определя усреднената температура на абсорбиращата повърхност и съответно  $Q_n$ .

$Q_D$  се получава след интегриране на темпа на премахване на излишната топлина (19), необходим за предотвратяване на покачането на вътрешната температура над долната граница на термостата, т.е. разликата между темпа на топлопреминаване през стената на Тромб към сградата и темпа на топлинни загуби през останалата част от сградата:

$$\dot{Q}_D = U_k A_r (T_{w,o} - T_i) + (UA)_{ad} (T_b - T_a)^+ \quad (19)$$

Балансът на топлинните потоци на абсорбиращата повърхност в този случай е:

$$\dot{S}(\tau\alpha) A_r = \bar{U}_L A_r (T_w - T_a) + U_k A_r (T_w - T_i) \quad (20)$$

След интегриране при използване на усреднени месечни стойности за количеството топлина  $Q_D$  се получава:

$$Q_D = \frac{U_k A_r (\tau\alpha)}{U_L + U_k} \sum_m (\dot{S} - \dot{S}_c)^+ \quad (21)$$

$\dot{S}_c$  представлява критично ниво на интензитета на слънчевата радиация, при което  $\dot{Q}_D = 0$ :

$$\dot{S}_c = \frac{1}{(\tau\alpha) A_r} \left[ (UA)_{ad} \left( \frac{U_L}{U_k} + 1 \right) \frac{T_b - \bar{T}_a}{T_i - \bar{T}_a} + \bar{U}_L A_r \right] (T_i - \bar{T}_a) \quad (22)$$

Уравнението (21) може да се преобразува по следния начин:

$$Q_D = \frac{U_k A_r \bar{S}_{\tau\alpha} N \bar{\phi}}{\bar{U}_L + U_k} \quad (23)$$

Параметърът  $\bar{\phi}$  представлява коефициент на дневна оползотворяемост на слънчевата радиация (24):

$$\bar{\phi} = \frac{(\tau\alpha) \sum_m (\dot{S} - \dot{S}_c)^+}{\bar{S}_{\tau\alpha} N} \quad (24)$$

$Q_{aux,\infty}$  (11) и  $Q_{aux,0}$  (12) дават границите на възможностите на системата (съответно максимална и минимална). Съответните фракции  $f$  за двата гранични случая са както следва:



$$f_{\infty} = 1 - \frac{Q_{aux,\infty}}{Q_{ad} + Q_w} \quad (25)$$

$$f_0 = 1 - \frac{Q_{aux,0}}{Q_{ad} + Q_w} = f_{\infty} - \frac{U_k}{\bar{U}_L + U_k} \bar{\phi} X \quad (26)$$

Съотношението за определяне на действителната фракция  $f$  е определено след серия от симулации осъществени чрез софтуера TRNSYS [3]. Като резултат е определена емпирична зависимост за  $f$  като функция от  $f_{\infty}$  (25) и коефициента  $Y$  (27), който изразява отношението на приведената акумулираща способност на сградата и стената на Тромб към енергията, която не би била оползотворена при хипотетичния случай на нулева акумулираща способност.

$$Y = \frac{C_{s,b} + 0,047 C_{s,w}}{Q_D} \quad (27)$$

Коефициентите  $C_{s,b}$  (28) и  $C_{s,w}$  (29) изразяват съответно акумулиращите способности на сградата и на стената на Тромб:

$$C_{s,b} = C(\Delta T_b) N \quad (28)$$

$$C_{s,w} = c \rho \delta A_r (\Delta T_w) N \quad (29)$$

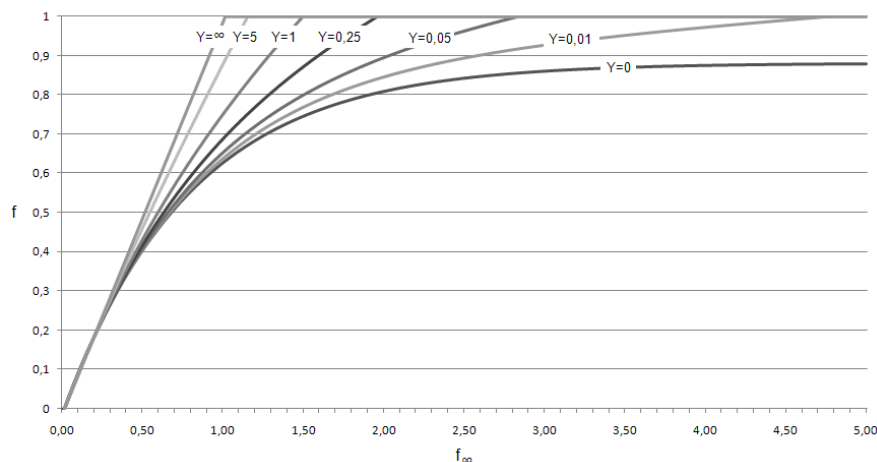
Уравнение (29) може да се преобразува (31), така че да се дефинира  $C_{s,w}$  като функция от  $Q_i$  (30):

$$Q_i = \frac{2kA_r}{\delta} (\Delta T_w) \Delta t N \quad (30)$$

$$C_{s,w} = \frac{c \rho \delta}{2k \Delta t} Q_i \quad (31)$$

$\Delta T_w$  е среден линеен температурен градиент в стената (1/2 от разликата на средните месечни стойности на температурите на външната и вътрешната повърхност на стената).

Зависимостта на  $f$  като функция от  $f_{\infty}$  и коефициента  $Y$  е илюстрирана на фиг.7.



Фиг. 7. Зависимост за  $f$  като функция от  $f_{\infty}$  и  $Y$  при UU метода

### Сравнение на моделите

Представени са модели на топлопреносните процеси в невентилируема стена на Тромб, които могат условно да се разделят на три нива на сложност. Най-сложните и съответно най-точни модели са динамичните модели, при които изчисленията се правят с времева стъпка от един час. Сложността на тези модели ограничава приложимостта им, тъй като моделирането и симулирането отнема време и изисква добра подготовка и сравнително високо ниво на знания. Второто ниво представляват месечните квазистационарни методи

като представените SLR и UU метод, които са създадени на базата на симулационни изследвания направени чрез по-сложните динамични модели, на базата на които са изведени определени емпирични зависимости. Работата с тези модели е по-бърза и лесна от динамичните модели, но за сметка на определено ограничаване на възможностите и приложимостта им.

SLR методът е по-прост от UU методът, но същевременно и с по-ограничени възможности, тъй като при него са направени по-голям брой предварителни приемания за голяма част от параметрите и стойностите дадени в таблици за изчисление на слънчевата фракция са ограничен брой, което налага интерполации. UU методът дава повече възможности за промяна на параметрите, но изисква повече изчисления и съответно въвеждането на по-голям брой стойности. Квазистационарният характер на двата месечни метода съответства на метода за изчисление използван в EN ISO 13790, но за момента в стандарта е въведен модел само за вентилируема стена на Тромб. Третото ниво представляват най-простите модели за изчисление на годишна база, като методът изведен на базата на изчисления направени чрез SLR метода. Тези модели имат приложение по-скоро като средство за получаване на ориентировъчни данни, когато е необходимо да се направи бърза оценка със сравнително ниска степен на точност. Същевременно тяхното приложение е силно ограничено поради липсата на достатъчно голям брой изследвания за различни климатични зони и различни конфигурации на стена на Тромб.

### **Заклучение**

Анализът на моделите показва, че няма изявен лидер сред тях, който да бъде международно приет като референтна база за сравнение. Сложността на динамичните модели ги прави неприложими за общия случай, тъй като за осъществяване на такова детайлно проучване се изискват много средства и обикновено те се прилагат при изпълнението на проекти с голямо финансиране. За да бъде моделът приложим за общия случай е необходимо търсенето на опростен метод за изчисление на месечна база. Тъй като двата такива представени метода имат известни ограничения е необходимо осъществяване на допълнителни измервания и анализи, и търсенето на подобрения на тези модели, както и на нови решения. В Технически Университет – София се предвижда изграждането на експериментална база, включваща пасивна къща, в която да бъдат вградени различни пасивни слънчеви системи. Една от целите на проучването е да се идентифицират модели на пасивни слънчеви елементи, включително на невентилируема стена на Тромб, които да бъдат широко приложими и да съответстват на общия характер на метода използван в EN ISO 13790.

### **Литература**

- [1] Ellis, P. (2003) Development and validation of the unvented Trombe wall model in EnergyPlus. Thesis (M.Sc.). University of Illinois at Urbana-Champaign: Urbana, IL
- [2] Torcellini, P., Long, N., Pless, S. and Judkoff, R. (2005) Evaluation of the low-energy design and energy performance of the Zion National Park Visitors Center. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. (NREL/TP-550-34607)
- [3] Duffie, J. and Beckman, W. (2006) Solar engineering of thermal processes. 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, pp.733-759
- [4] Reddy, T.A., Battisti, R., Schweiger, H., Weiss, W., Morehouse, J.H., Vijayaraghavan, S. and Goswami, D.Y. (2007) 'Solar thermal energy conversion' in: Kreith, F. and Goswami, D.Y. (eds) Handbook of energy efficiency and renewable energy. UK: Taylor & Francis Group, pp.20.1-20.133
- [5] Balcomb, J.D. and McFarland, R.D. (1978) 'A simple empirical method for estimating the performance of a passive solar heated building of the thermal storage wall type'. Proceedings of the Second National Passive Solar Conference, Philadelphia, PA, 16-18 March
- [6] Kaminski, D. and Jensen, M.K. (2005) Introduction to thermal and fluids engineering. Hoboken, NJ: Wiley

[7] TRNSYS 16 Manual (n.d.) Madison, WI: University of Wisconsin

[8] Klein, S.A. and Beckman, W.A. (2001) F-CHART - User's manual. Madison, WI: F-Chart Software

[9] Wilson, A (1979) *Thermal storage wall design manual*. Albuquerque, NM: Modern Press

**Автори**

маг. инж. Борислав Николов Станков – докторант, ТУ-София, ЕМФ, катедра ТХТ, email: bostan@mail.bg

проф. д-р инж. Никола Георгиев Калоянов – ТУ-София, ЕМФ, катедра ТХТ, email: ngk@tu-sofia.bg