

Модели на топлопреносните процеси във вентилируеми фасади

Борислав Станков, Никола Калоянов

Представена е класификация на вентилируемите фасади и са разгледани основните параметри влияещи върху енергийните им характеристики. Представени са основните динамични и квазистационарни методи за енергийното им моделиране. Научното изследване е финансирано 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

Вентилируемите фасади заемат все по-важно място като архитектурен елемент в офис сградите през последните 20 години [1]. Функционалността им се обуславя от възможността да се постигне подобряване на топлинния комфорт и естественото осветление в сградата, както и намаляване на нивото на шум, като в същото време да се намалят разходите за енергия. Вентилируемите фасади спомагат за намаляване на необходимостта от отопление през зимните месеци, поради способността им да акумулират топлина и да служат като буферна зона между сградата и околната среда. През горещите периоди, използването на вентилируеми фасади също може да намали разходите за енергия, ако подходящо се използва ефекта на естествена вентилация. Сложността на нестационарните топлообменни процеси в този тип архитектурен елемент прави математическо им описание трудно и изисква моделите на топлопреносните процеси да могат коректно да обхванат и опишат много въздействащи фактори, включително механизмите за регулиране, като системи за засенчване и вентилационни отвори. Съществува разнообразие от методи на вентилация и типове конструкции на вентилируеми фасади, което изисква допълнителна гъвкавост на моделите.

Класификация на вентилируемите фасади

Вентилируемата (двойна) фасада се състои от две остъклени фасади (слоя) разделени от въздушен коридор [2]. Движението на въздуха в това пространство се осъществява посредством вентилационни отвори, като може да се реализира естествена, смесена или принудена вентилация. В този доклад се разглежда случая само с естествена вентилация. Дизайнът на тези вентилационни отвори е от голямо значение за резултатния въздушен поток и съответно за топлинния комфорт в сградата [1]. В много случаи, за да се осигури защита от прегряване през охладителния сезон, във въздушния коридор се интегрират слънцезащитни (засенчващи) механизми, като обикновено това са щори. Ширината на въздушния коридор може да варира значително, в рамките на 10 cm до 2 m [1]. Същевременно трябва да се има в предвид, че според досегашните изследвания, разстоянието между двата фасадни слоя не трябва да бъде по малко от 60 cm, защото в противен случай се възпрепятства въздушния поток, особено ако във въздушното пространство има засенчващи механизми [3]. Височината на въздушния коридор зависи от ширината, като допустимата височина се обуславя от допустимото загряване на въздуха в канала, и обикновено е най-много до 15 етажа [2].

Вентилируемите фасади могат да се класифицират основно по два критерия: конструкция и метод на вентилацията, като се има в предвид, че методът на вентилацията може да се променя при една и съща вентилируема фасада, при наличие на подходящите регулиращи механизми. Методите вентилация са следните [1]:

- Външна вентилируема завеса – през фасадата протича само външен въздух;
- Вътрешна вентилируема завеса – през фасадата протича само вътрешен въздух;
- Подаване на въздух – външен въздух навлиза отдолу и се подава към помещението отгоре;
- Изхвърляне на въздух – въздух от помещението навлиза отдолу и се изхвърля навън отгоре;
- Буферна зона – вентилационните отвори са затворени и въздушното пространство оформя буферна зона между сградата и околната среда.

Съществуват различни варианти за класификация на типовете конструкции на вентилируеми фасади, според различните литературни източници, но като обобщение може да се използва следната класификация:

- Модулен тип – фасадата е разделена хоризонтално на всеки етаж и разделена вертикално на определени разстояния (обикновено съответстващи на вътрешното разделение на помещенията), като се оформят множество прилепени един до друг модули и всеки от тях има отделни вентилационни отвори;

- Коридорен тип – фасадата е разделена хоризонтално на всеки етаж, но няма вертикални разделения (или те са сравнително малко), като по този начин се оформя коридор между двата фасадни слоя, по продължение на целия етаж или група от няколко офиса, който е достатъчно широк за да може в него да влизат хора (за поддръжка и т.н.); всеки коридор има отделни вентилационни отвори;

- Шахтово-модулен тип – фасадата е разделена подобно на модулният тип, но всеки модул граничи не с друг модул, а с шахта, която преминава през няколко етажа; всеки модул има собствен долен вентилационен отвор, а горния отвор е свързан със шахтата, като по този начин се засилва ефекта на подемните сили; въздухът се изхвърля през горния отвор на шахтата;

- Монолитен тип – фасадата не е разделена нито вертикално, нито хоризонтално, а се оформя голямо пространство между двата слоя, което е достатъчно широко за да може в него да влизат хора (за поддръжка и т.н.), и в много случаи се простира около цялата сграда (фасада);

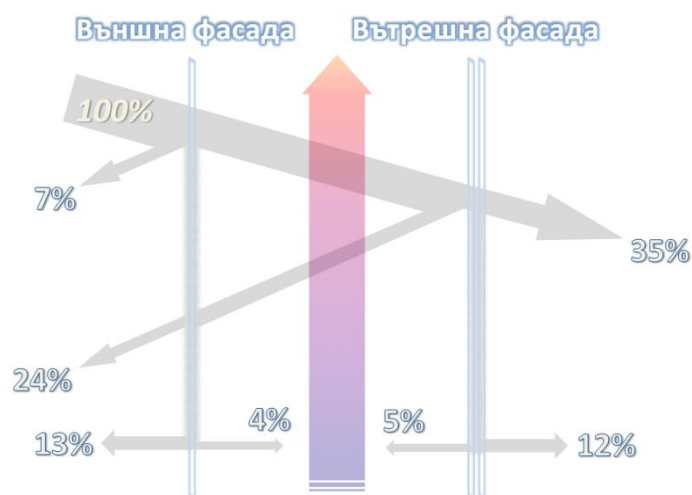
- Решетъчен тип – по подобие на монолитния тип, но външният слой не се състои от монолитно остъкление и вентилационни отвори, а е съставен от подвижни решетки, като по този начин дори и при затворени решетки и вентилационни отвори на вътрешния слой, фасадата не е въздухоплътна.

Изборът на типа остъкление за двата фасадни слоя зависи до голяма степен от типа на вентилиране. Ако фасадата се използва като външна вентилируема завеса, изолиращият стъклен екран се поставя на вътрешния слой, а на външния слой се поставя единично стъкло [1]. В противоположния случай, ако фасадата се използва като вътрешна вентилируема завеса, изолиращият стъклен екран се поставя на външния слой, а единично стъкло се поставя на вътрешния [1]. Като цяло, практиката показва, че обикновено външният слой е от единично закалено стъкло (или вместо това ламинирано стъкло), докато за вътрешния слой се използва двоен, или по-рядко троен, незакален стъклопакет, запълнен с въздух, аргон или криптон [2]. Почти във всички случаи вътрешната фасада не е изцяло остъклена [4].

Енергийни характеристики на вентилируемите фасади

След като лъчистият топлинен поток от слънцето достигне до вентилируемата фасада, част от него преминава през нея и достига до вътрешността на сградата, друга част се отразява от външния и вътрешния фасаден слой обратно към околната среда, а останалата част се абсорбира от конструктивните елементи на фасадата. Определено количество от тази абсорбирана радиация се отдава от вътрешния фасаден слой към вътрешната среда и от външния фасаден слой към околната среда, а останалото количество се отдава на въздуха във въздушния канал. Топлинният баланс на фасадата зависи от много фактори,

като: слънчевата радиация (пряка, дифузна и отразена), външните климатични условия, разположението и ориентацията на сградата, конструкцията на фасадата, свойствата на използваните материали, системите за регулиране (засенчване и вентилационни отвори) и др. Поради това пропорциите на тези потоци е трудно да се определят, но като пример, на фиг.1 е показана илюстрация на тези потоци и ориентировъчни данни за съотношенията им [3].



Фиг. 1. Разпределение на енергийните потоци във вентилируема фасада

Моделирането на естествената вентилация в канала на вентилируемата фасада е сложна задача, тъй като въздушният поток е неизвестен и същевременно е взаимно свързан с температурния профил. Естествената вентилация е предизвикана от два ефекта : (1) коминен ефект, вследствие от температурно разширение; и (2) ветрови ефект, вследствие от разликите в наляганията предизвикани от ветровете. Комбинацията от двата ефекта създава пълна разлика в наляганията между входящия и изходящия вентилационен отвор. При слаб вятър, коминния ефект силно преобладава, докато при силен вятър има явно преобладаване на ветровия ефект, а между тези два режима има и преходен режим, при който двата ефекта могат да се допълват или да си противодействат [5]. Отношението между височината и ширината на въздушния канал има решаващо значение за общия ефект на подемните сили и резултантите температури в канала [6].

Ветровото налягане в дадена точка зависи от скоростта и посоката на вятъра, както и от геометрията на сградата, а локалната скорост на вятъра зависи до голяма степен от оградящите структури. Това са важни фактори за енергийните характеристики на вентилируемите фасади, но определянето на стойностите им може да бъде нелека задача [5]. В същото време оптичните свойства на стъклени екрани имат съществено значение за топлопритоците от пряко слънцегреене и парниковия ефект във вентилируемата фасада, вследствие на който се наблюдава стабилно повишаване на температурата във вертикална посока (температурна стратификация) [6].

Температурната разлика между температурата на въздуха във вентилируемата фасада и външната температура е сред най-важните параметри за определяне на енергийната ефективност на фасадата, тъй като това създава ефекта на „въздушен буфер“, който придава изолационни свойства на фасадата - колкото по-голяма е тази температурна разлика, толкова по малки са топлинните загуби през оградящите елементи през зимата [7]. Според данните от експериментални изследвания, има силна връзка между големината на въздушния поток във вентилируемата фасада и тази температурна разлика, като същевременно температурата на въздуха в канала е в много голяма степен зависима от абсорбираната слънчева радиация и изглежда много слабо зависима от външната

температура [7]. Други експериментални изследвания показват, че презумпцията, че температурата на входящия вентилационен отвор е равна на вътрешната или съответно външната температура, обикновено е невалидна, а в същото време тази температура е важно гранично условие за решаване на системата уравнения при симулиране на вентилируемите фасади [8].

Съществен фактор за енергийния баланс на вентилируемата фасада са засенчващите системи. Те могат да бъдат различни видове: венециански или ролетни щори, жалузи и др [5]. Поставянето на засенчващите системи между двете фасади дава много по-добри резултати спрямо поставянето им отвън, където отражателните им свойства се намаляват от прах, кал и други частици, или отвътре, където се получават вторични топлопритоци [3]. Същевременно разположението на тези елементи във въздушния канал е определящо за характера и силата на въздушния поток. Според някои проучвания, най-ефективни резултати за намаляване на прегряването са получени, когато засенчващите механизми са разположени близо до външната фасада [6]. Засенчващите системи са трудни за моделиране и изискват вземането в предвид на серия от фактори, особено при използването на венециански щори например [5]: (1) многократно отражение на късовълнова радиация в елементите; (2) преминаване на въздух между елементите при обтичане; (3) абсорбиране на топлина от засенчващата система, която в последствие се отнема от обтичания въздух и усложнява описанието на конвективния топлообмен; (4) осъществяване на дълговълнов лъчист топлообмен между засенчващата система и стъклените екрани. Също така, отразената от земята слънчева радиация е важен фактор за коректното определяне на топлинните потоци, когато има венециански щори разположени близо до нивото на земята [5].

Динамични модели

Софтуерите TRNSYS, ESP-r, TAS и EnergyPlus разполагат с най-силните динамични модели за симулиране на вентилируеми фасади в контекста на оценката на енергийните характеристики на цялата сграда [5][4]. Тези софтуери дават възможност да се свържат термични и флуидодинамични модели, които да комуникират помежду си и чрез итерации да се достигне сравнително голяма точност на решението. Въпреки това, всички тези програми срещат сходни трудности свързани със симулирането на енергийните потоци във вентилируеми фасади [5]. Едно от тези затруднения например, е моделирането на засенчващите елементи, което предизвиква необходимостта от създаването на повече зони и може да доведе до големи грешки, ако не бъде направено достатъчно добре [4]. Друго затруднение е моделирането на въздушният поток, който е не само силно променлив, като включва турбулентни и ламинарни течения, но и може да протича в обратна посока [9].

EnergyPlus използва COMIS, модел основан на мрежовия метод, за определяне на въздушния поток в канала [10]. TRNSYS също използва COMIS за тази цел, като комбинацията е автоматизирана в инструмента TRNFLOW [5]. COMIS дава добри резултати по отношение на дебита на въздушния поток при зададена температурна разлика, но използването на мрежови модел като COMIS води до системно подценяване на топлопреносните коефициенти в канала и повърхностните температури, в сравнение с поточните CFD модели [10]. От друга страна, многото взаимодействия между различните зони и външни условия усложняват дискретизирането на пространството и времето и съответно увеличават сложността на използване на CFD моделите [9]. Същевременно CFD пакетите не разполагат с възможността да анализират лъчистите потоци със същата точност, както програмите за енергийно симулиране на сгради, както и не могат да симулират енергийното потребление на сградите [10]. За да се избегнат тези недостатъци, споменатите по-горе енергийни модели могат да се комбинират със CFD модел. Направено е подобно изследване с комбинация от EnergyPlus и PHOENICS CFD, който използва k-ε турбулентен модел, при което е открито добро припокриване между резултатите от симулациите и експериментални данни [10]. В случая с ESP-r, такива взаимодействия между различни

компоненти са интегрирани в единна система, което дава известно предимство на този софтуер пред останалите [4].

Съществуват и други динамични модели, които имат по-ограничени възможности. Например софтуерът CAPSOL е по-малко функционален от по-горните модели, но и по-опростен. Друг софтуер – WIS също позволява симулиране на остъквени фасадни системи, включително вентилируеми фасади, но не дава възможност за симулиране на системи за регулиране [5]. От друга страна софтуерите BRISCO, TRISCO и VOLTRA дават възможност за по-детайлно моделиране и симулиране на ефекта на топлинни мостове във фасадата [5].

Квазистационарни модели

На базата на извършената работа по проекта BESTFACADE, финансиран по програмата Интелигентна Енергия Европа, е създаден квазистационарен модел, с цел той да бъде внедрен в стандарта ISO 13790. Моделът е базиран на модела на зимна градина в стандарта DIN V 18599, който е модифициран така, че да бъде приложен за вентилируеми фасади [11]. На практика моделът е приложен само за отоплителния сезон и разглежда вентилируемата фасада като буферна зона, която намалява топлинните загуби. Така, в рамките на ISO 13790, вентилируемата фасада се разглежда като неотопляемо помещение, за което по метода на BESTFACADE се намират температурата на въздуха и коефициента на топлинни загуби от вентилация. Количеството слънчева радиация, което преминава през фасадата и достига до вътрешността на сградата и количеството, което се абсорбира във фасадата, се определят на същия принцип, както при модела за зимна градина в DIN V 18599.

Методът на BESTFACADE е валиден само, когато вентилируемата фасада действа като външна вентилируема завеса. Коефициентът на топлинни загуби от вентилация се определя по следната формула (1):

$$H_{V,ue} = h_v \cdot \left[\frac{H_{T,iu} (\theta_i - \theta_e) + \Phi_u}{h_v + \frac{H_{T,iu} + H_{T,ue}}{dT^{0,5}}} \right]^{1/3} \quad (1)$$

Където:

$H_{T,iu}$ – коефициент на топлинни загуби от топлопреминаване от помещението към фасадата [W/m²K];

$H_{T,ue}$ – коефициент на топлинни загуби от топлопреминаване от фасадата към околната среда [W/m²K];

Φ_u – Слънчеви топлопритоци във фасадата [W/m²];

θ_i – температура на помещението [°C];

θ_e – температура на външния въздух [°C];

dT – температурна разлика между изходящия вентилационен отвор и външната температура [°C].

h_v е коефициент, който се определя по зависимостта (2):

$$h_v = f \cdot \rho_u \cdot c \cdot \Delta\theta_{rel} \cdot A_{cav} \left(\frac{2gH_{cav}}{\theta_e \xi_{tot}} \right) \quad (2)$$

Където:

$f = 1,33$;

ρ_u, c – плътност [kg/m³] и специфичен топлинен капацитет [J/kgK] на въздуха в канала;

A_{cav}, H_{cav} – площ [m²] и височина [m] на въздушния канал;

$\Delta\theta_{rel}$ е безразмерна относителна температурна разлика (3):

$$\Delta\theta_{rel} = \frac{dT}{\theta_u - \theta_e} \quad (3)$$

θ_u е температурата на въздуха в канала [°C], която се определя от формулата (4):

$$\theta_u - \theta_e = \left[\frac{H_{T,iu} (\theta_i - \theta_e) + \Phi_u}{h_v + \frac{H_{T,iu} + H_{T,ue}}{dT^{0,5}}} \right]^{2/3} \quad (4)$$

Коефициентът на аеродинамично съпротивление във въздушния канал ξ_{tot} се определя съгласно методиката в стандарта ISO 15099.

Температурната разлика dT се приема за 2°C или се определя чрез итерации [11].

Обемният поток на въздухът в канала може да се определи по (5):

$$\dot{V}_{cav} = \frac{H_{V,ue}}{\rho_u c \Delta\theta_{rel}} \quad (5)$$

Към модела на BESTFACADE е създаден и опростен подход за определяне на кратността на въздухообмена и температурата на въздуха във вентилируемата фасада [11].

Заклучение

Софтуерни продукти като TRNSYS, ESP-r, TAS и EnergyPlus дават добри възможности за симулиране на вентилируеми фасади, особено когато е осъществена комбинация между термичния модел, обикновено основан на метода на крайните разлики, и CFD модел за симулиране на въздушното течение. Моделирането се усложнява значително, когато се използват засенчващи системи вградени във фасадата. Сложността на процеса на моделиране изисква време и средства, които в много случаи може да не бъдат налични. Базата от потребители на динамичните модели също е ограничена от сложността им. Същевременно единственият квазистационарен модел на вентилируеми фасади, който е създаден да бъде съвместим с ISO 13790, е силно ограничен. Моделът е приложим само при един тип вентилиране на фасадата и само за отоплителния сезон. Освен това моделът изисква въвеждането на входни данни, които могат да бъдат трудни за определяне. В резултат на това, при липса на достатъчно опит от страна на потребителя, резултатите от модела могат да бъдат много неточни.

В Технически Университет – София се предвижда изграждането на експериментална база, включваща пасивна къща, в която да бъдат вградени различни пасивни слънчеви системи, включително вентилируема фасада. В допълнение към резултатите от физическите измервания, ще бъдат осъществени симулации с някои от динамичните модели, така че да се натрупа достатъчно голяма база данни за идентифицирането на нови квазистационарни модели, които да бъдат широко приложими и да съответстват на общия характер на метода използван в ISO 13790. Предвижда се новите модели да бъдат базирани на вече съществуващите, но да се опростят някои зависимости, както и да се намерят по-добри емпирични корелации за тези зависимости. Моделите трябва да позволяват отчитане на използването на различни стратегии и механизми за регулиране, както и да обхванат динамиката на топлопритоците от слънчева радиация.

Литература

1. Schiefer, C., Heimrath, R., Hengsberger, H., Mach, T., Streicher, W., Santamouris, M., Farou, I., Erhorn, H., Erhorn-Kluttig, H., De Matos, M., Duarte, R. and Blomsterberg, A. (2008) *Best*

Practice for Double Skin Façades. (EIE/04/135/S07.38652). [Online] Available from: <http://www.bestfacade.com/pdf/downloads/Bestfacade%20Publishable%20Report.pdf>.

2. Poirazis, H. (2006) *Double skin façades: a literature review*. Lund, Sweden: Lund University. (Report of IEA SHC Task 34 ECBCS Annex 43).

3. Blumenberg, J., Spinnler, M. and Sattelmayer, T. (n.d.) *Double skin façade systems – a comprehensive review on thermal and energetic behavior*. Munich, Germany: Technische Universität München.

4. Dickson, A. (2004) *Modelling double-skin façades*. Thesis (M.Sc.). University of Strathclyde: Glasgow, UK.

5. Flamant, G., Heijmans, N. and Guiot, E. (2004) *Ventilated double façades*. Brussels, Belgium: Belgian Building Research Institute.

6. Tascon, M. (2008) *Experimental and computational evaluation of thermal performance and overheating in double skin façades*. PhD thesis. University of Nottingham: Nottingham, UK.

7. Baldinelli, G. and Cottana, F. (2007) 'Numerical analysis of a double skin façade with integrated movable shading systems'. Paper presented at the Fifth International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Sun City, South Africa, 1-4 July.

8. Saelens, D., Roels, S. and Hens, H. (2003) 'On the influence of the inlet temperature in multiple-skin façade modelling'. Paper presented at the Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, 11-14 August.

9. Hensen, J., Bartak, M. and Drkal, F. (2002) 'Modeling and simulation of a double-skin façade system', ASHRAE Transactions, 108 (2), pp.1251-1259.

10. Pappas, A. and Zhai, Z. (2006) 'Energy simulation of a double skin façade: a process using CFD and EnergyPlus'. Proceedings of the Second National IBPSA-USA Conference, Cambridge, Massachusetts, 2-4 August, pp.145-152.

11. Erhorn, H. (ed) (2007) *BESTFACADE WP4 Report: Simple calculation method*. [Online] Available from: http://www.bestfacade.com/pdf/downloads/Bestfacade_WP4-Report_26_07_07.pdf

Автори

маг. инж. Борислав Николов Станков – докторант, ТУ-София, ЕМФ, катедра ТХТ, email: bstankov@tu-sofia.bg

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