FRI-9.2-1-THPE-06

THERMAL LOADING AT TRIMMING STRUCTURES IN THE WALL OF TROMB

Prof. Nikola Kaloyanov, PhD Chief assistant Borislav Stankov, PhD Chief assistant Georgi Tomov Department of Thermal and Refrigeration Engineering, Technical University of Sofia Tel.: 0882 270 566 E-mail: <u>ngk@tu-sofia.bg</u>, <u>bstankov@tu-sofia.bg</u>

Assoc Prof. Nina Penkova, PhD Department of Silicate Technology, University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia Tel.: 0886 08 44 66 E-mail: <u>nina@uctm.edu</u>

Abstract: This paper presents thermal load analysis of insulating glass units (IGU) integrated in Trombe walls. The analysis is based on modelling and numerical simulation of the heat transfer processes in the construction. The boundary conditions of the models are determined on the base of experimental data, obtained from an existing Trombe wall test module, situated at the Technical University of Sofia. The investigations are performed for different systems of IGU fixing in the Trombe wall. The temperature fields and subsequent climatic loads in the IGU at winter conditions are computed. The possibilities for glass falure due to the internal pressure loads are analysed.

Keywords: heat transfer, insulating glass units, Trombe wall, mathematical modelling, CFD

въведение

Пасивната система за оползотворяване на слънчева енергия тип "стена на Тромб" е сграден ограждащ елемент с функции на колектор и акумулатор на слънчева енергия. Основните й елементи са прозрачно покритие, през което преминават слънчевите лъчи и акумулираща маса с абсорбираща повърхност, която поглъща, съхранява и в последствие отдава топлина. При затворената стена на Тромб полезният ефект се получава чрез радиационно и конвективно отдаване на топлина от акумулиращия елемент към обема, разположен зад него (помещението). При отворената стена на Тромб топлината се отдава от абсорбиращата повърхност чрез конвекция на въздушен поток, протичащ между нея и прозрачния елемент, който я пренася към помещението (фиг. 1).



Фигура 1. Конфигурации на стена на Тромб [Kaloyanov et al., 2015]

Изследвания на ефекта от използването на стена на Тромб, в сравнение с топлинно изолирана стена с референтен коефициент на топлопреминаване (съгласно Наредба 7 за

енергийна ефективност на сгради), доказват предимствата на пасивната система през отоплителния сезон за по-голямата част от територията на България, при определени условия [Stankov et al., 2015]. Основни фактори, влияещи върху енергийните характеристики на стената на Тромб, са вида на абсорбционното покритие и прозрачния елемент. Използването на двойно остъкление (стъклопакет) води до намаляване на топлинните загуби от външната повърхност на акумулиращия елемент към околната среда и респективно до увеличаване на ефективността на пасивната система.

Поради спецификата на топлообмена в стената на Тромб, температурното поле и топлинното натоварване в стъклопакетите са различни в сравнение с тези при стъклопакети в директни пасивни системи за оползотворяване на слънчева енергия. Това важи и за механичното натоварване на прозрачните елементи, възникващо при температурни разширения и разлики между вътрешното и външното налягане. Последните се дължат на изменения на температурата на херметизирания газ ΔT , метеорологичното налягане Δp_m и надморската височина ΔH в процеса на експлоатация на стъклопакета, спрямо същите при процеса на производството му [Neugebauer, 2009; Feldman et al., 2014]. В резултат се формира така нареченото вътрешно натоварване върху елементите на стъклопакета, което в комбинация с напрежения от температурни разширения може да доведе до дефектиране на стъклените панели. Ако стъклата не се деформират и обемът на херметизираният газ не се изменя, разликата между вътрешното и атмосферното налягане (isohoric pressure) ще бъде:

$$\Delta p_{is} = C_1 \Delta T + C_2 \Delta H + \Delta p_m, \, kPa$$
⁽¹⁾

където С₁=0,34 kPa/K; С₂=0,012 kPa/m.



Фигура 1. Деформация на стъклените панели при стъклопакети при разлика между налягането на херметизирания газ pg и локалното атмосферно налягане pa

Стъклото е еластичен материал - стъклените панели се деформират и надналягането (или подналягането) на херметизирания газ по абсолютна стойност е по-ниско от Δp_{is} . Но предсказването му е важно – Δp_{is} е изходна информация за предсказване на резултантните напрежения и деформации в конструкцията (Velchev at al., 2006, Feldman et al., 2014).

Събираемите във формула (1), зависещи от изменението на метеорологичното налягане и надморската височина, могат да се предскажат според конкретното местоположение на използване на стъклопакета. Те не зависят от конструкцията, начина на фиксирането му върху фасадата и предназначението му. Разликата в налягането, дължаща се на изменението на температурата на газа, зависи от тези фактори и варира при цикличните изменения на външните климатични условия и на слънчевата радиация. При изследване на топлообмена и на резултантните механични процеси при стъклените панели на двоен стъклопакет, интегриран в окачена фасада на сграда (Penkova et al., 2017; Ivanov et al., 2017), е получена детайлна информация за дневното вариране на температурните полета и напреженията в рамките на денонощие през месеците с най-високи и най-ниски температури в конструкцията (януари и юли). Установено е, че вътрешното натоварване от температурни разлики без комбинация от други натоварвания няма да доведе до дефекти в стъклата.

В настоящата работа е представено моделно изследване на топлообмена и температурното поле в двоен стъклопакет, изпълняващ функцията на прозрачен елемент в затворена стена на Тромб, с цел предсказване на топлинното натоварване на конструкцията.

ИЗЛОЖЕНИЕ Обект на изследване

Обектът на настоящето изследване е стъклопакет, за чиито елементи е налична информация за термо-механичното им поведение при топлинно натоварване ((Penkova et al., 2017; Ivelin et al., 2017) Конструкцията е с габаритни размери 1088 mm x 1288 mm, алиминиев дистанционер с пълнеж от силикагел и дебелина на отделните слоеве 4 mm стъкло без покритие, 24 mm въздушен слой и 4 mm стъкло без покритие. Проведени са изследвания при два варианта на фиксиране на стъклопакета в прозрачната конструкция на стената на Тромб:

- окачена фасада чрез профили (метални или PVC) с малка видима широчина. В този случай може да се приеме, че профилите не оказват съществено влияние върху топлообмена в стъклопакета и могат да се пренебрегнат при геометричното моделиране.

- отваряема прозоречна система с рамка със сравнително високо топлинно съпротивление, чието влияние върху топлообмена в стъклопакета не може да бъде пренебрегнато априори. В настоящата работа е прието това да е петкамерна PVC рамка (фигура 2). Габаритните размери на прозореца са 1230 mm x 1480 mm.



Фигура 2. PVC дограма с двоен стъклопакет а) Част от напречен разрез в близък план б) Мрежа от крайни обеми

Предполага се, че елементите на стъклопакета ще бъдат подложени на максимални механични натоварвания при минимална температура и максимално подналягане в херметизирания газ при зимни условия, тъй като извън отоплителния период се препоръчва засенчване на конструкцията или отваряне/демонтаж на стъкленото покритие в стената на Тромб. При измервания относно външните климатични условия и температурните полета в експериментална затворена стена на Тромб на територията на Технически университет – София е установено, че най-ниските средни температури в системата са през месец януари при липса на отопление в помещението [Stankov, 2015]. Прието е моделните изследвания да бъдат проведени за моменти от януари с най-ниски температури (7 ч.) и най- високи стойности на слънчевия радиационен поток (13 ч.), в които се очакват максимално и минимално подналягане в херметизираното пространство на стъклопакета. Определените на базата на натурни измервания средни температури на въздушното пространство и на

външната повърхност на акумулиращия елемент, плътност на слънчевия поток и коефициент на топлопредаване чрез конвекция от вътрешната стъклена повърхност към въздушното пространство на стената на Тромб [Stankov, 2015], са използвани в граничните условия за моделните изследвания.

Моделиране и числено изследване на топлообмена в прозрачен елемент от затворена стена на Тромб

Детайлна информация относно триизмерните температурни, скоростни полета и налягането в стъклопакета може да се получи чрез решаване на долуописаната система уравнения по метод на крайните обеми при стационарни условия на топлообмен, съответстващи на моментните (Penkova et al., 2017).

Флуидна среда (херметизирано газово пространство на стъклопакета): уравнение за непрекъснатост; уравнения на движението; енергийно уравнение; модел на турбулентност; модели на динамичен и топлинен граничен слой.

Нефлуидна среда (стъклени листа, дистанционер, уплътнения, твърди елементи и въздушни камери в рамката): енергийно уравнение за твърда неподвижна среда (уравнение на Фурие-Кирхоф).

С достатъчна за практиката точност въздухът в камерите на рамката може да бъде разгледан като твърдо тяло с ефективен коефициент на топлопроводност, отразяващ конвективния и радиационния топлообмен. Подробности за топлофизичните характеристики на материалите са дадени в [Kumar, 2010]. Поглъщането на слънчева енергия от елементите на стъклопакетите и рамката се моделира чрез източников член в енергийното уравнение или чрез граничните условия. Влиянието на топлообмена чрез излъчване в инфрачервения спектър между повърхностите, ограничаващи херметизираното газово пространство, се отчита чрез Radiosity solver method в средата на ANSYS/CFX.

Граничните условия са от II род и отразяват топлообмена чрез излъчване и конвекция между външните повърхности на прозрачната конструкция и околната среда, и съответно между вътрешните повърхности и затвореното пространство в стената на Тромб.

Плътност на топлинния поток на външните повърхности:

$$\Phi_{se} = h_{c,se}(T_{e} - T) + \sigma \varepsilon_{se}(T_{r,me}^{4} - T^{4}) + A_{se}I_{s}, Wm^{-2}$$
(2)

където h_{c,se}, Wm⁻²K⁻¹, е коефициент на топлопредаване чрез конвекция между външната повърхност и въздуха от околната среда с температура T_e; A_{se} - поглъщателна способност на елемента, при външното стъкло е равна на пълната поглъщателна способност на стъкления панел Â₁; I_s, Wm⁻² - плътност на слънчевия поток; ε_{se} - степен на чернота на външната повърхност; T_{r,me}, K - средна температура на околната среда за изчисляване на радиационния топлообмен в инфрачервения спектър [Kumar, 2010].

Плътност на топлинен поток на вътрешните повърхности:

$$\mathbf{\Phi}_{s_{i}} = \mathbf{h}_{c,s_{i}} (\mathbf{T}_{i} - \mathbf{T}) + \sigma \varepsilon_{s_{i}} (\mathbf{T}_{r,m_{i}}^{4} - \mathbf{T}^{4}), \, \mathbf{W} \mathbf{m}^{-2}$$
(3)

където $h_{c,si}$, $Wm^{-2}K^{-1}$, е коефициент на топлопредаване чрез конвекция между повърхността и въздуха в затвореното пространство на стената на Тромб; T_i , K - температура на въздуха в стената на Тромб; ϵ_{si} - приведена степен на чернота, отчитаща степените на чернота на вътрешната повърхност и на абсорбиращото покритие; $T_{r,mi}$, K - средна температура на външната повърхност на акумулиращия елемент.

Плътност на топлинен поток на външната повърхност на вътрешното стъкло:

$$\mathbf{\Phi}_{g} = \hat{\mathbf{A}}_{2} \mathbf{I}_{s}, \mathbf{W} \mathbf{m}^{-2}$$
(4)

където \hat{A}_2 е пълната поглъщателна способност на външното стъкло.

Поглъщателните способности и степените на чернота на елементите от конструкцията, участващи в топлообмена с външната и вътрешната околна среда са: РVС профил (бял): $A_{se}=\varepsilon_{se}=\varepsilon_{si}=0.95$; стъклени панели: $\varepsilon_{se}=0.84$; $\hat{A}_1=0.13$; $\hat{A}_2=0.10$; приведена степен на чернота $\varepsilon_{si}=0.75$ (при степен на чернота на абсорбиращото покритие 0.87).

Детайли относно условията на топлообмен и резултати от числените изследвания са представени в таблица 1. Изменението на температурата на херметизирания въздух е определено спрямо температура при херметизиране на стъкопакета 293 К. Δp_{is} е изчислено само на базата на ΔT на въздуха (при нулеви ΔH и Δp_m).

		Таблица 1
Условия на топлообмен	- Вариант 1.	- Вариант 2.
	Стъклопакет в окачена	Стъклопакет в прозоречна
	фасада	система
Януари, 7:00ч.	Средна температура на	Средна температура на
$T_e=271 \text{ K}; T_{r,me}=260 \text{ K}; I_s=0 \text{ Wm}^{-2}$	херметизирания въздух:	херметизирания въздух:
$T_i=280 \text{ K}; T_{r,mi}=282 \text{ K};$	T=274 K	T=275 K
$h_{si}=1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}; h_{se}=20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	ΔT = -19 K; Δp_{is} = - 6.41 kPa	ΔT = -18 K; Δp_{is} = -6.18 kPa
Януари, 13:00ч.	Средна температура на	Средна температура на
$T_e = 276 \text{ K}; T_{r,me} = 265 \text{ K}; I_s = 500 \text{ Wm}^{-2}$	херметизирания въздух:	херметизирания въздух:
$T_i=283K; T_{r,mi}=286 K;$	T=283 K	T=284 K ;
$h_{si}=1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}; h_{se}=20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$	ΔT = -10 K; Δp_{is} = -3.44 kPa	ΔT = -9 K; Δp_{is} = -3.03 kPa

Средните температури на въздуха в стъклопакета, температурните му разлики и Δp_{is} се различават несъществено при двата изследвани варианти. Вътрешното натоварване ще се редуцира почти 2 пъти в рамките на деня. На фигури 3 са представени визуализации на температурните полета в изследваните обекти. От тях е видно, че повърхностните температури на стъклата при двата варианта са приблизително еднакви.





Подналягането във въздушното пространство на стъклопакета преди огъването на стъклените панели е 6,41 kPa при окачената фасада и 6.18 kPa при прозоречната система (разлика под 4 %). След огъването на стъклата то ще се редуцира – за изясняване на този процес е необходим допълнителен механичен анализ.

За приблизителна оценка на очакваните ефекти може да се изполва информацията от предходен анализ [Ivanov et al.,2017]. Установено е, ако същия стъклопакет е част от директна пасивна система за оползотворяване на слънчева енергия (окачена фасада в сграда) на територията на гр. София, при най-ниските температури на ок. среда Δp_{is} = - 4,56 kPa. На базата на допълнителен анализ на механичното поведение на конструкцията е установено, че резултантното вътрешно натоварване е безопасно за стъклените панели: максималните опънови напрежения (приблизително 13 MPa) са над 5 пъти по-ниски от якостта на опън на стъклото (70 MPa). Получената в настоящата работа минимална стойност на Δp_{is} е 1.4 пъти по-ниска от установената в [Ivanov et al.,2017] долна граница. Ако при нея максималното опъново напрежение в стъклените панели се повиши при същото съотношение, то пак ще

бъде приблизително 4 пъти по-ниско от якостта на стъклото при фиксиране на стъклопакета в окачена фасада.

ИЗВОДИ

Температурите в стъклопакет - прозрачен елемент от затворена стена на Тромб, са пониски, а вътрешните натоварвания, дължащи се на температурни разлики на херметизирания газ – по-високи в сравнение със същите при стъклопакет, който е част от прозрачно сградно ограждение. При условията на топлообмен, обусловени от климатичните условия в гр. София, това вътрешно натоварване ще бъде безопасно за прозрачните компоненти на конструкцията при фиксирането й в окачена фасада, освен ако не се комбинира с допълнителни натоварвания от други фактори (вътрешни и външни).

За оценка на опасността от дефектиране на стъклопакета като част от прозоречна система, е необходимо да бъде проведен допълнителен анализ на механичното поведение на компонентите му при отчитане на особеностите на закрепването му в рамката.

Проведените изследвания и участието в настоящата конференция са осъществени с финансовата подкрепа на договор ДФНИ Е 02/17 "Параметричен анализ за оценка на ефективността на прозрачни структури в системи за оползотворяване на слънчевата енергия", финансиран от фонд "Научни изследвания" към Министерство на образованието и науката на Република България

REFERENCES

ANSYS CFX-Solver, Release 12.0: Theory (2010)

Feldmann, M., Kasper, R. and collective, (2014). *Guidance for European Structural Design of Glass Components*, Joint Research Centre Scientific and Policy Reports

Ivanov, I., Penkova, N., Velchev, Draganov, I., Bozduganova V., D., Iliev, (2017). *Mechanical stresses in insulating glass units under transient thermal loadings*, Proceedings of XXII Scientific Conference with International Participation FPEPM 2017, Technical University of Sofia, 207-214 (in Bulgarian)

Kaloyanov, N., Tomov, G., Stankov, B., *Modelling the heat tranfer processes in a vented Trombe wall*, Proceedings of XX Scientific Conference with International Participation FPEPM 2015, Technical University of Sofia, 220-357 (in Bulgarian)

Kumar, S., (2010), Investigation of 3D heat transfer effect in fenestration product, Thesis, University of Massachusetts

Neugebauer, J., (2009). A Design Concept for Bent Insulated Glasses for the Reading Room of the Berlin State Library, Proceedings of Glass Performance Days

Penkova, N., Krumov, K., Ivanov, I., Velchev, D., Iliev, V., Geshcova, Z., (2017). *Transient heat transfer and subsequent thermal loads at insulating glass units*, Proceedings of XXII Scientific Conference with International Participation FPEPM 2017, Technical University of Sofia, 185-192 (in Bulgarian)\

Stankov, B., (2015), *Models of the heat transfer processes in passive solar systems*, PhD thesis, Technical University of Sofia (in Bulgarian)

Stankov, B., Kaloyanov, N., Tomov, G., *Energy efficiency of the unvented Trombe wall*, Proceedings of XX Scientific Conference with International Participation FPEPM 2015, Technical University - Sofia, 301-309 (in Bulgarian)

Velchev, D., Ivanov, I., Todorov, M., (2006). *Finite Element Analysis of Insulating Glass Units*, Mechanics of Machines, Varna, 63, 39-43 (in Bulgarian)