



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

ЕНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА ТОПЛИННА И ХЛАДИЛНА ТЕХНИКА

Ас. маг. инж. Георги Делчев Томов

**СТРУКТУРНО – ПАРАМЕТРИЧЕН АНАЛИЗ
НА ОТВОРЕНА СТЕНА НА ТРОМБ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.4. Енергетика

Научна специалност: Енергопреобразуващи технологии и системи

Научен ръководител: проф. д-р инж. Никола Калоянов

СОФИЯ - 2018 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „ТХТ“ към Факултет ЕМФ на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 09.05.2018 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 27.09.2018 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-181 / 29.05.2018 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р. Никола Калоянов – председател
2. Доц. д-р Цветан Божков – научен секретар
3. Проф. д-р Иван Касабов
4. Проф. д-р Нина Пенкова
5. Доц. д-р Васил Йорданов

Рецензенти:

1. Доц. д-р Цветан Божков
2. Доц. д-р Васил Йорданов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Факултет ЕМФ на ТУ-София, блок №2, кабинет № 2344.

Дисертантът е свободен докторант към катедра „ТХТ“ на ЕМФ, ТУ-София. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: ас. маг. инж. Георги Томов

Заглавие: „Структурно-параметричен анализ на отворена стена на Тромб”

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Пасивните слънчеви системи могат да спомогнат значително за решаване на енергийните и ергономични проблеми на съвременните сгради, но липсват задълбочени и надеждни анализи за енергийната и икономическата им ефективност в условията на България.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертацията е да бъде оценен потенциала на отворената стена на Тромб за повишаване на енергийната ефективност и намаляване на проблемите известни като „симптоми на болната сграда“. Основната му задача е да се създаде опростен модел за определяне на параметрите и енергийните ѝ характеристики в режим на подаване на външен въздух при климатичните условия на България. Методите за изследване, използвани в разработката, са числени експерименти със софтуер за динамично моделиране и симулиране и натурни експерименти проведени на специално изградена за целта на площадката на изследователската база на ТУ – София отворена стена на Тромб.

Научна новост, практическа приложимост и апробация

Извършен е структурно-параметричен анализ на пасивен елемент „Отворена стена на Тромб“ и са определени факторите от които зависи ефективността ѝ. Разработената методика за оценка на ефективността на отворена стена на Тромб в режим подаване на външен въздух позволява да се решават проектни и проверочни задачи за използване на пасивния елемент за решаване проблема „синдром на болната сграда“ и повишаване на енергийната ефективност на сградите в България. Резултатите от многофакторните числени моделни изследвания са потвърдени с натурни изследвания, проведени на изграден за целта експериментален стенд в обект „пасивна къща“ на експерименталната площадка на ТУ-София.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в седем броя научни статии, от които една самостоятелна. .

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 255 страници, като включва 5 глави: „Въведение“, „Пасивни слънчеви системи“, „Стена на Тромб“, „Структурно-параметричен анализ“, „Определяне на параметрите на отворена стена на Тромб“, „Заклучение“; списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 205 литературни източници, като 141 са на латиница и 7 на кирилица. Работата включва общо 160 фигури и 42 таблици. В автореферата фигурите и таблиците са номерирани самостоятелно, но съответните на дисертацията означения за дадени в скоби.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните сгради трябва да осигуряват комфорт на обитателите, като същевременно са енергийно ефективни и екологични, което предполага широко използване на възобновяема енергия. Пасивните слънчеви системи са архитектурно-инженерни решения, които отговарят на тези условия – енергийните им разходи (съпоставени с енергийните печалби) и екологичният отпечатък за целия им жизнен цикъл са пренебрежимо

малки, освен това са изградени от леснодостъпни естествени материали. Единственото препятствие пред по-широкото им разпространение се крие в трудностите за „предсказване“ на ефекта от използването им, тъй като липсват сравнително опростени методи за оценка. Всеки конкретен вариант изисква комплексен анализ на множество параметри, който може да бъде направен единствено чрез динамично моделиране и симулиране с някои от мощните софтуери - EnergyPlus, ESP-r и TRNSYS. Проблемът е, че тези продукти са скъпи и използването им изисква високо ниво на подготовка от страна на потребителите. Това налага създаване на евтини, опростени и общодостъпни методи за енергийни анализи. Всичко това, съчетано с липсата на задълбочени и надеждни анализи за енергийната и икономическата ефективност на различните видове пасивни слънчеви системи в условията на България, извиква необходимостта от разработки като настоящата дисертация.

Научното изследване в настоящата дисертация се фокусира върху пасивната слънчева система „стена на Тромб“ – в частност към отворената конфигурация в режим на подаване на външен въздух в помещенията.

ЦЕЛТА на дисертацията е да бъде оценен потенциала на отворената стена на Тромб за повишаване на енергийната ефективност и намаляване на проблемите известни като „симптоми на болната сграда“, като се създаде опростен модел за определяне на параметрите и енергийните ѝ характеристики в режим на подаване на външен въздух при климатичните условия на България. **ЕТАПИТЕ** на разработка са:

Проучване

- Преглед на предходни научни изследвания на пасивни слънчеви системи; видовете конструкции на стената на Тромб и резултатите от използването им.
- Анализ на съществуващите стационарни и динамични методи за енергийно моделиране и симулиране на пасивни слънчеви системи
- Определяне на параметрите влияещи върху ефективността на отворената стена на Тромб в режим на подаване на външен въздух.

Структурно-параметричен анализ

- Числени експерименти със софтуер за динамично моделиране и симулиране на модел на отворена стена на Тромб при естествена и принудена вентилация, геометрично конфигурирана съобразно възможностите на специално изграденият обект „Пасивна къща“ на площадката на изследователската база на ТУ – София, което би позволило сравнителен анализ с последващи натурни експерименти.
- Оценка на влиянието на различните топлофизически и оптични параметри на прозрачния, абсорбиращия и акумулиращ елементи на стената.
- Оптимизиране режима на работа по време (непрекъснат / по часове) на отворената стена на Тромб при естествена и принудена вентилация
- Изграждане на отворена стена на Тромб съобразена с модела и резултатите от Числените експерименти с възможности за осъществяване на режими с естествена и принудена вентилация.
- Натурни експерименти при естествена и принудена вентилация
- Съпоставка на резултатите от числените експерименти и натурни експерименти

Определяне на параметрите на отворената стена на Тромб

- Числени експерименти със софтуер за динамично моделиране и симулиране на отворена стена на Тромб при естествена и принудена циркулация за създаване на база данни с резултати за параметрите и ефективността на различни конфигурации при вариране на геометричните фактори (размери на стената: височина, широчина, разстояние между прозрачния и акумулиращия елементи).
- Числени експерименти със софтуер за динамично моделиране и симулиране на отворена стена на Тромб при естествена и принудена циркулация за създаване на база данни с

- резултати за параметрите и ефективността на различни конфигурации с вариране на климатичните фактори (местоположение и ориентация).
- Базов модел за оценка на параметрите и ефективността на работа на отворена стена на Тромб в режим на подаване на външен въздух за представителна година за климатична зона София: Зона 5 по класификацията на ASHRAE .
 - Разширен модел за оценка на параметрите и ефективността на работа на отворена стена на Тромб в режим на подаване на външен въздух за представителна година за климатични зони Плевен, Варна, Пловдив, и Сандански – ASHRAE Зона 4. Анализ на точността на Разширения модел и чувствителността му по отношение на входящите параметри. Оценка за приложимостта му.
 - Обобщен модел и Методика за оценка на параметрите и ефективността на работа на отворена стена на Тромб в режим на подаване на външен въздух за климатичните зони на България.

Заклучение

- Обобщения
- Приложимост на резултатите
- Научно-приложни и приложни приноси

ГЛАВА 2. ПАСИВНИ СЛЪНЧЕВИ СИСТЕМИ

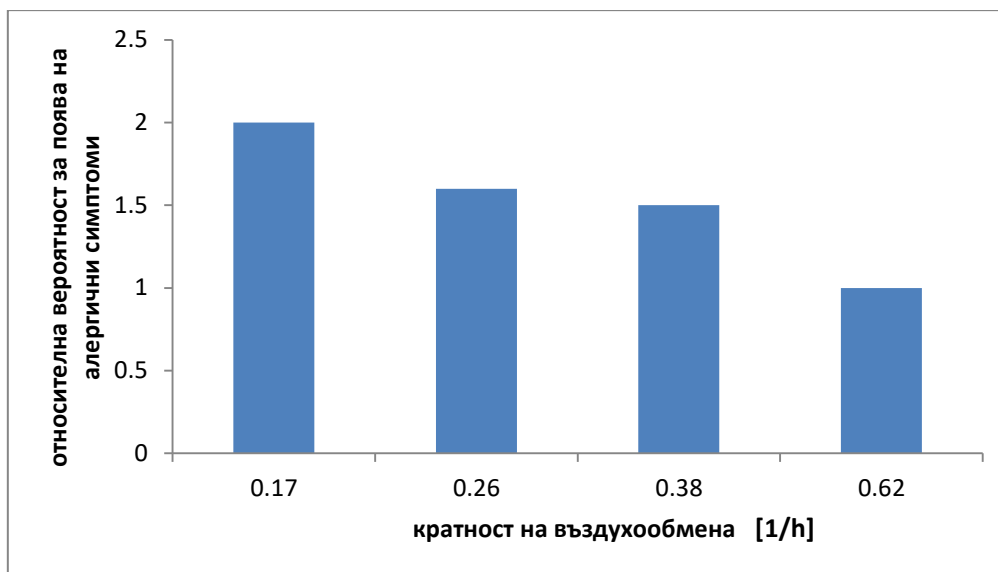
Енергийни и екологични проблеми

С развитието на цивилизацията нуждите от енергия значително изпреварват възможността за задоволяването им при спазване принципите на устойчиво развитие, което налага както коренно нови технологични подходи. Слънцето е в основата на интереса към възобновяемите източници, появил се след енергийните кризи и заплахите от екологични катастрофи.

Качество на въздушната среда

Качеството на въздушната среда в затворени помещения (IAQ – Indoor Air Quality) се определя като степен на удовлетвореност на обитателите от микроклимата. Този показател е свързан както с усещането за свежест и комфорт, така и със здравето и производителността на труда и става все по важен, предвид тенденцията жителите на градовете да прекарват малко време на открито. Особено уязвими са специфични групи от населението, а именно: деца, бременни жени, възрастни хора, както и тези с респираторни или алергични заболявания. В последните две десетилетия от миналия век в развитите страни количеството на алергичните и астматични заболявания се е удвоило – следствие главно на влошеното качество на въздуха в помещенията, предизвикано от два основни фактора: внедряване на множество нови материали (особено полимери) и повсеместното използване на електронни устройства; повишеното качество на дограмата, свеждащо инфилтрацията на външен въздух почти до нула. Резултатите от множество научни изследвания свидетелстват за това, че кратността на въздухообмена в затворено помещение от 0.17 до 0.62 [1/h] намалява вероятността от поява на алергични симптоми наполовина и редуцира значително риска от заболяване от астма – фиг.2-1. Качеството на въздушната среда оказва значително влияние и върху производителността, особено що се отнася до умствен труд. Отчетена в различни дейности, като четене и решаване на задачи, при деца до 10 години успеваемостта може да се подобри с 15%.

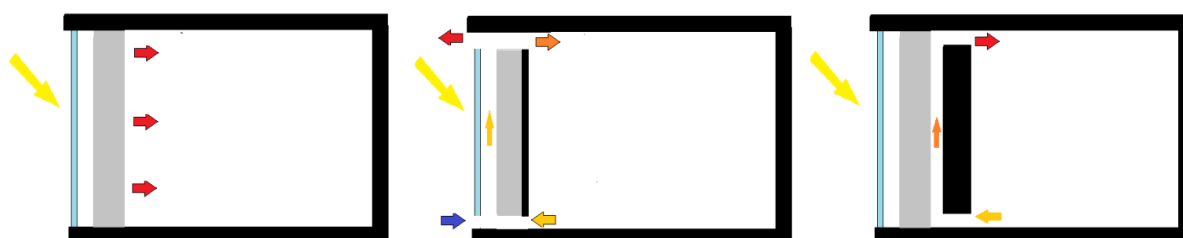
Качеството на въздуха в българските училища е лошо, защото са малко сградите с изградени вентилационни инсталации и в масовия случай се разчита на естествена вентилация, като най-често експлоатацията и техническото обслужване не са на ниво.



Фиг.2-1 (2.2-1) Намаляване на вероятността за поява на алергични симптоми в зависимост от кратността на въздухообмена

ГЛАВА 3. СТЕНА НА ТРОМБ

Подходящо интегрирана, стената на Тромб може да превърне „обвивката“ на сградата от елемент с нетни загуби в такъв с нетни печалби. Основното предимство пред обикновеното остъкляване (директни печалби) е в това, че акумулираната енергия се използва в моменти на необходимост.



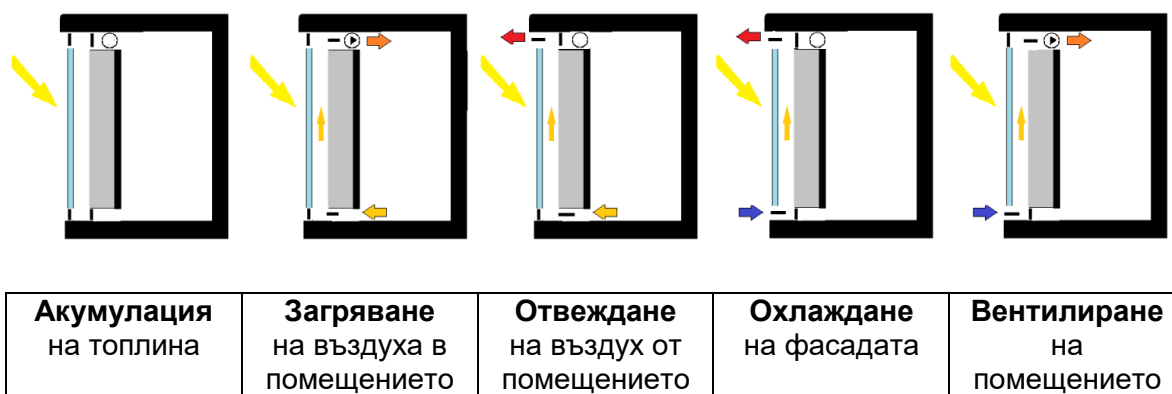
Затворена стена на Тромб Отворена стена на Тромб Стена на Тромб–Мишел

Фиг.3-1 (3-1) Основни конфигурации на стена на Тромб – принципни схеми

Принципни схеми на основните конфигурации на стена на Тромб са дадени на фиг.3-1. Конструктивни елементи на стената на Тромб са: прозрачно покритие, през което преминават слънчевите лъчи; абсорбираща повърхност; акумулираща маса, която съхранява и в последствие отдава топлина. Погълнатата слънчева топлина може да достигне до вътрешната среда по два начина. При **затворената стена на Тромб** пространството между прозрачния и акумулиращия елементи е херметизирано и полезният ефект се получава чрез топлопреминаване през акумулиращия елемент и радиационно и конвективно отдаване на топлината към обема разположен зад стената – отопляемото помещение. При **отворената стена на Тромб** топлината се отдава от абсорбиращата повърхност на въздушен поток създаден чрез естествена конвекция в пространството между

стената и прозрачния елемент при класическа конструкция, или между задната страна на акумулиращата стена и стената на помещението при композитна стена (стена на Тромб-Мишел). Разновидност на отворената стена на Тромб е вентилируемата стена на Тромб, където топлообменът е интензифициран от принудително обдухване на акумулиращия елемент, като за целта се използват механични съоръжения (вентилатори) и се вкарва допълнителна външна енергия.

Възможни са различни режими на вентилиране, както по отношение на организацията на въздухообмена, така и по отношение на дебита на въздуха, а от там – на скоростта му на движение, която има пряко отношение към процеса на топлообмен.



Фиг.3-2 (3-2) Режими на работа при отворена стена на Тромб

ДИНАМИЧНО МОДЕЛИРАНЕ и СИМУЛИРАНЕ - МОДЕЛ в TRNSYS

За осъществяване на част от изследванията е създаден модел в TRNSYS. Това е един от най-силните инструменти за моделиране и симулиране на нестационарни топлинни системи, чиято отворена модулна структура го прави изключително гъвкав по отношение на моделирането на разнообразни системи с различни нива на сложност. Обща схема на модела е показана на фиг.3-3. Моделът се състои от няколко комуникиращи помежду си компоненти. В основата е компонент от стандартните библиотеки на TRNSYS, Type36, който съставлява метод и алгоритми за изчисляване на топлинните потоци и температурите в конструкцията на стената на Тромб. Компонентът е разработен от Лабораторията по слънчева енергия на университета Уисконсин-Мадисън. Входящите и изходящи параметри са показани на фиг.3-4.

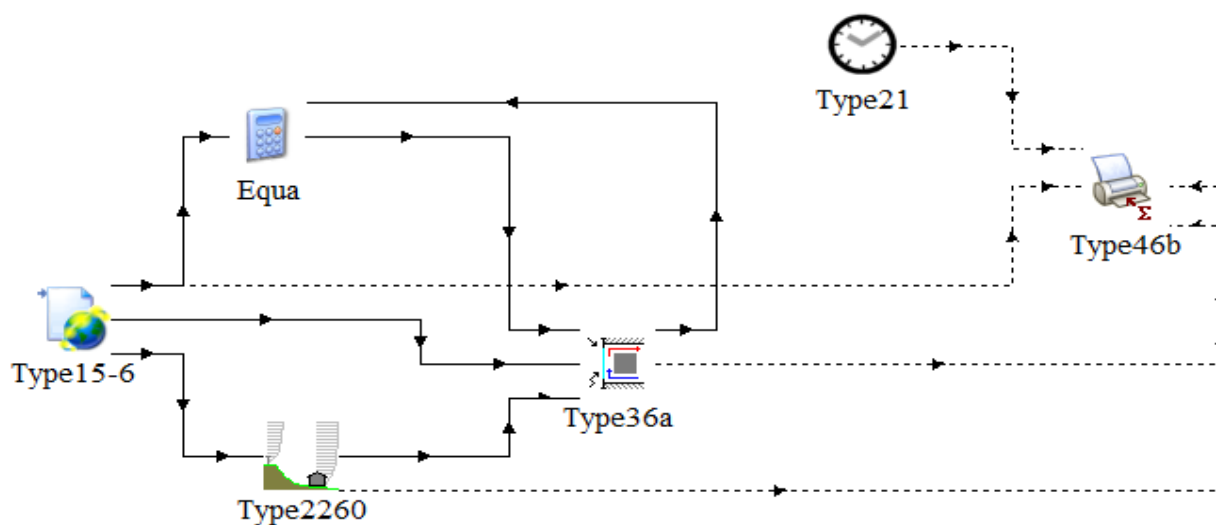
ЧИСЛЕНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ

Отворената стена на Тромб може да работи в режим на естествена или принудена циркулация, като съответните отвори осигуряващи работа в определен режим могат да бъдат съоръжени с клапи. На фиг.3-5 е показана схема на **вентилируема стена на Тромб** с един вентилатор и с означение на клапите (K1, K2, K3, K4), при която вентилаторът е в комплект с клапите K3. Възможна е комбинация с 2, и повече вентилатора интензифициращи процесите на топлообмен в различните режими. В създадения за целите на числените експерименти модел в TRNSYS за прозрачен елемент е заложено прозрачно стъкло (едно или два броя) с коефициент на енергопреминаване $g_{gl}=0.8$ и излъчвателна способност $\varepsilon_{gl}=0.84$. Оптичните характеристики на различните абсорберни покрития са дадени в табл.3-1, а топлофизичните характеристики на различните материали на акумулиращия елемент са дадени в табл.3-2.

Моделът позволява изследването на енергийната ефективност на разнообразни конструкции и режими на вентилиране на стената на Тромб при различни експлоатационни условия. Чрез провеждането на многофакторни експерименти могат да бъдат идентифицирани

най-силно влияещите фактори и да се анализират възможностите за тяхното оптимизиране. В резултат на числените експерименти получаваме данни за:

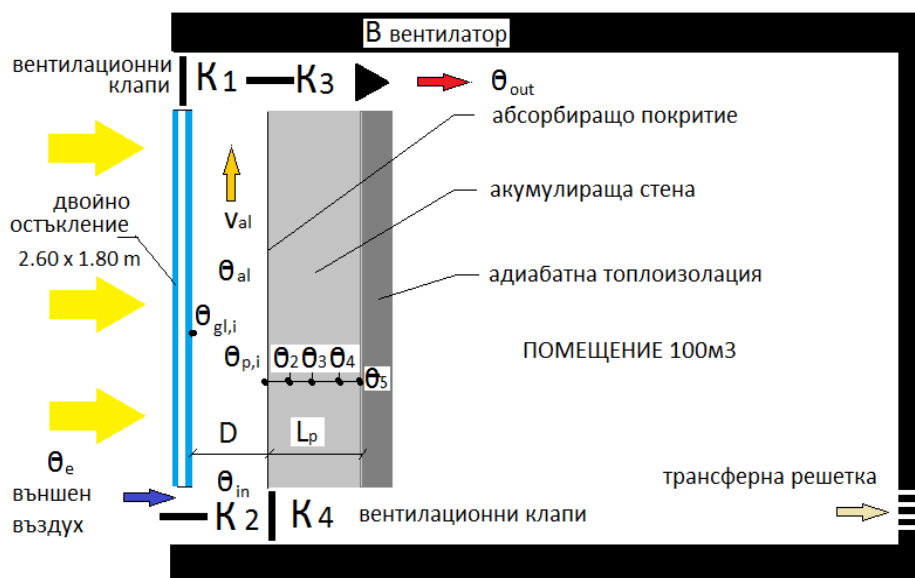
θ_e	°C	– външна температура, температура на постъпващия въздух;
θ_{gl}	°C	– температура на вътрешната страна на прозрачния елемент;
θ_1	°C	– температура на акумулиращата повърхност;
θ_{out}	°C	– температура на постъпващия в помещението въздух; θ_{vent}
$\theta_2-\theta_5$	°C	- температури в акумулиращата стена, през $\frac{1}{4}$ от дебелината ѝ
Q_{total}	kWh	- енергията от пълното слънчево облъчване на повърхността на прозрачния екран за коментирувания период
Q_{abs}	kWh	- абсорбираната за коментирувания период топлина
$\dot{m}_{al}$	kg/h	- среден масов дебит на въздуха преминаващ през стената в резултат на естествена конвекция



Фиг.3-3 (3.3.2-1) Обща схема на модела в TRNSYS



Фиг.3-4 (3.3.2-3) Входящи и изходящи параметри в модел на стена на Тромб



Фиг.3-5 (3.4-1) Схема на вентилируема стена на Тромб с един вентилатор.

ВИД НА АБСОРБИРАЩАТА ПОВЪРХНОСТ	Коефициент на поглъщане на слънчевата радиация α_{ab}	Степен на чернота в инфрачервения спектър ϵ_{ab}
Черна акрилна боя	0.96	0.87
Селективно покритие (медно фолио с черен хром)	0.95	0.11

Табл.3-1 (3.4-2) Оптични характеристики на абсорберни повърхности

МАТЕРИАЛ	Коефициент на топлопроводност λ_p [W/m ² K]	Плътност на материала ρ [kg/m ³]	Специфичен топлинен капацитет c_p [kJ/kg°C]
Тухла - кирпич	0.75	880	1730
Тухла - клинкерна	0.85	840	1500
Тухла - силикатна	1.5	840	2000
Каменна зидария - пясъчник	1.3	712	2200
Каменна зидария - варовик	1.5	720	2180
Бетон	1.7	840	2000

Табл.3-2 (3.4-3) Топлофизични характеристики на материалите на акумулация елемент

За оценка на ефективността на оползотворяването на слънчевата енергия са дефинирани и получени стойности за следните месечни (за периода) характеристики:

Ефективност на абсорбиране на топлина от системата като отношение на абсорбираната за месеца топлина (Q_{abs}) и енергията от пълното слънчево облъчване на повърхността на прозрачния екран (Q_{total}):

$$\eta_{abs} = \frac{Q_{abs}}{Q_{total}} \quad (3-1)$$

Ефективност на усвояване на абсорбираната топлина от вентилационния въздух като отношение на поетата от вентилационния въздух топлина (Q_{vent}) и абсорбираната за месеца топлина (Q_{abs}):

$$\eta_{vent} = \frac{Q_{vent}}{Q_{abs}} \quad (3-2)$$

Ефективност на усвояване на пълната слънчева енергия за загряване на вентилационния въздух като отношение на поетата от вентилационния въздух топлина (Q_{vent}) и енергията от пълното слънчево облъчване на повърхността на прозрачния екран (Q_{total}):

$$\eta_{thermal} = \frac{Q_{vent}}{Q_{total}} \quad (3-3)$$

Коефициент на температурна ефективност като отношение на средната месечна температурна разлика на загрявания вентилационен въздух и максимално възможната:

$$\eta_{\theta} = \frac{(\theta_{vent,cp} - \theta_{e,cp})}{(\theta_{1,cp} - \theta_{e,cp})}, \text{ където:} \quad (3-4)$$

$\theta_{vent,cp}$, °C – средната месечна стойност на температурата на подавания към помещението вентилационен въздух; $\theta_{vent,cp} = \theta_{out,cp}$

$\theta_{1,cp}$, °C – средната месечна стойност на температурата θ_1 на абсорбиращата повърхност на акумулиращата стена;

$\theta_{e,cp}$, °C – средната месечна стойност на температурата θ_e на външния въздух.

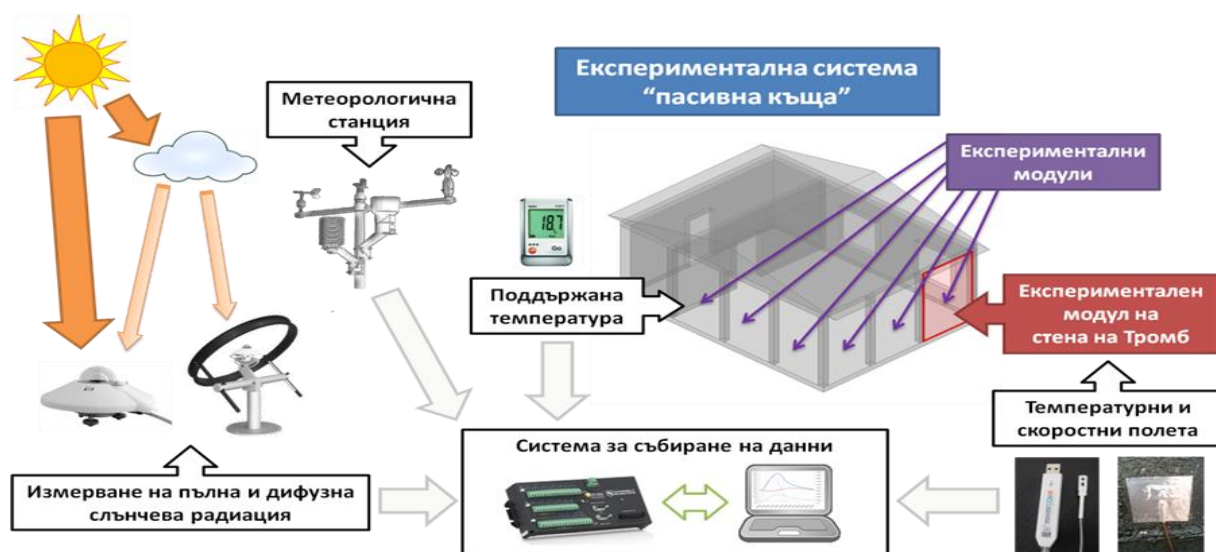
Като резултат от динамичните симулации, моделът дава подробна картина на топлинния баланс на стената на Тромб. Това позволява осъществяването на детайлни анализи на поведението на системата при различните матрици на факторните стойности.

НАТУРНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ

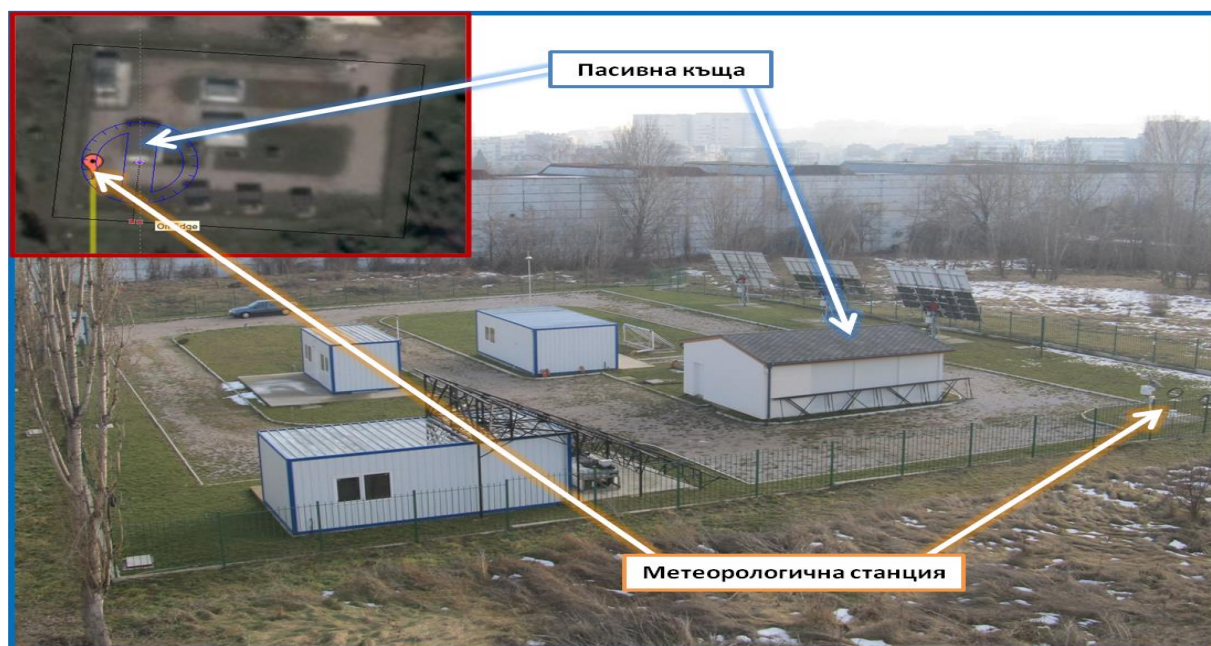
Натурните експерименти са проведени на обект „Пасивна къща“, находящ се на територията на специално изградената Изследователска база на ТУ-София, която представлява едноетажна сглобяема къща с обща площ 48 m². Четирите ѝ фасади са ориентирани в посоки близки до идеалните север, юг, изток и запад. Южната и западната фасада на голямото помещение са разделени на по три секции всяка. Секциите са с приблизителни размери – 2 m ширина и 2.8 m височина и са пригодени за монтиране на експериментални модули на различни пасивни слънчеви системи. В най-източната секция на южната фасада е интегриран експериментален модул „затворена стена на Тромб“, а в най-западната бе изграден **модул „отворена стена на Тромб“**, на която са проведени коментираните в тази работа натурни експерименти. В непосредствена близост до експерименталната система – наричана по-нататък „Пасивна къща“ – е разположена метеорологична станция, която включва и система за измерване на пълната и дифузната слънчева радиация. Данните от метеорологичната станция, от измервателните уреди на експерименталния модул и от измерената вътрешна температура в къщата се записват в обща база данни на всеки пет минути и на всеки час. На

Фиг. 3-7е показана обща схема на експерименталната система, изглед и сателитна снимка на експерименталната площадка - на фиг.3-7 и на фиг.3-8 - снимки на пасивната къща и метеорологичната станция след изграждането на модула „отворена стена на Тромб“. Експерименталният модул „отворена стената на Тромб“ е с височина 2.68 m и ширина

1.84 m. Прозрачният елемент е с 5-камерни PVC профили и двоен стъклопакет от 2 слоя прозрачно стъкло с коефициент на енергопреминаване $g_{gl}=0.8$ и излъчвателна способност $\varepsilon_{gl}=0.84$. В горния и долния му край, по цялата ширина на конструкцията, са монтирани профили с подвижна клапа, осигуряваща процеп за вход/изход на въздуха с максимален размер $\delta=0.015m$. Конструкцията е разположена на отстояние 0.07m пред акумулацияния елемент. Акумулацияният елемент е зид с дебелина 0.25m, изграден от клинкерни тухли, измазан с гладка циментова мазилка и разделен термично и аеродинамично по вертикалата на две самостоятелни стени, всяка с размери 2.15m x 0.72m. Върху едната (означена в работата с **bp**) е нанесен слой черна акрилна боя, а върху другата (**sc**) е замонолитен лист поцинкована ламарина покрит със селективно покритие - медно фолио с черен хром. Направена е вътрешна изолация от SPS изолационен материал с дебелина 0.15m и коеф.на топлопроводност $\lambda=0.032 W/(mK)$.



Фиг. 3-6 (3.5.1-1) Обща схема на експерименталната система

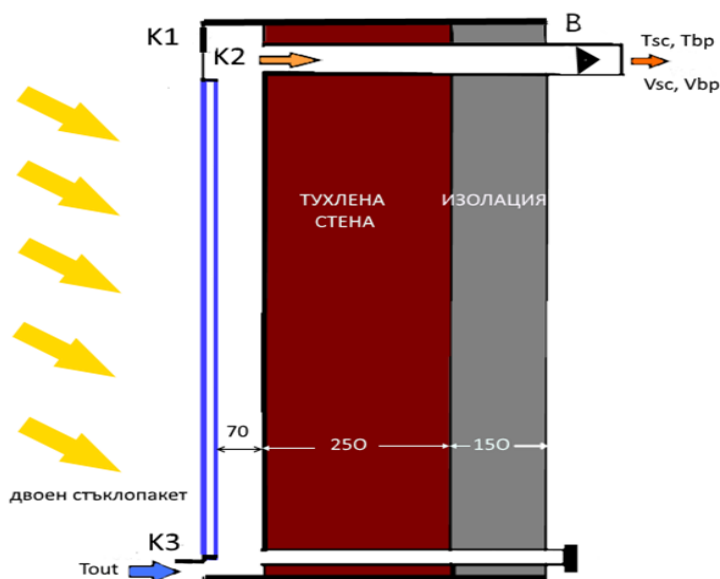


Фиг. 3-7 (3.5.1-2) Изглед и сателитна снимка на експерименталната площадка



Фиг. 3-8 (3.5.1-4) Модули „затворена стена“ и „отворена стена“ на Тромб

Горните вентилационни отвори (по един на всяка от стените) към помещението са с $\phi=0.150\text{mm}$, а долните (по 2 броя за всяка от стените) – с $\phi=0.75\text{mm}$. В средата на всяка от двете половини на акумулиращия елемент са пробити технологични отвори, през които преминават кабелите на сензорите. Площта на входящите и изходящи вентилационни отвори е както следва – $A_{v,in}=0.0112500\text{ m}^2$; $A_{v,out}=0.0176625\text{ m}^2$. Разстояние между входящи и изходящи отвори - $H_v = 2.10\text{ m}$. Монтирани са 2 броя вентилатори (максимални дебит $180\text{ m}^3/\text{h}$ и напор 110 Pa ; електрическа мощност 30W) с регулатор на оборотите. Схема на конструкцията на експерименталния модул и снимка на експерименталната установка са показани на фиг.3-9 и фиг.3-10.



Фиг.3-9 (3.5.1-5) Схема на модула „отворена стена на Тромб“



Фиг.3-10 (3.5.1-6) Експериментална установка в работното помещение

ГЛАВА 4. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕН АНАЛИЗ

Ефективността на отворената стена на Тромб зависи от множество фактори, като най-важните са свързани с: географското разположение; ориентацията; конструкцията; характеристиките и параметрите на отделните елементи; режимът на работа.

ЧИСЛЕНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ ПРИ ПРИНУДЕНА И ЕСТЕСТВЕНА ВЕНТИЛАЦИЯ

Базови (константни) фактори на модела:

- Местоположение – гр.София
- Небесна ориентация – юг; наклон 90° ; азимут 0° ; без външно засенчване
- Размери – $H=2.60\text{m}$; $W=1.80\text{m}$; фактор на рамката – 0.1; $H_v=2.50\text{m}$

Варирани фактори:

- разстояние между прозрачния и акумулиращия елементи D (mm)
- площ на вентилационните отвори (при естествена вентилация) A_v (m^2)
- дебит на въздуха/скорост (за принудена вентилация) V (m^3/h); v (m/s)
- материал на акумулиращия елемент (Тип 1 до Тип 6)
- дебелина на акумулиращия елемент – L (mm)
- вид на покритието – B (черна боя); S (селективно)

Конструктивните варианти в зависимост от вида на абсорбционното покритие и броя на прозрачните елементи са както следва:

B1 – черна матова боя, единично остъкление;
 B2 – черна матова боя, двойно остъкление;
 S1 – селективно покритие, единично остъкление;
 S2 – селективно покритие, двойно остъкление.

При симулацията са варирани:

v (m/s) – скоростта на въздуха: $v = 0.5, 1.0, 1.5$ m/s;

A_v (m²) – площ на изходящите вентил. отвори $A_v = 0.00785; 0.02355; 0.07850$ m²;

D (mm) – разстоянието между акум.стена и прозрачните елементи $D = 30, 60, 90$ mm;

L (mm) – дебелина на акумулационната стена $L=100, 150, 200, 250$ mm

РАНГ НА ЗНАЧИМОСТ НА ФАКТОРИТЕ

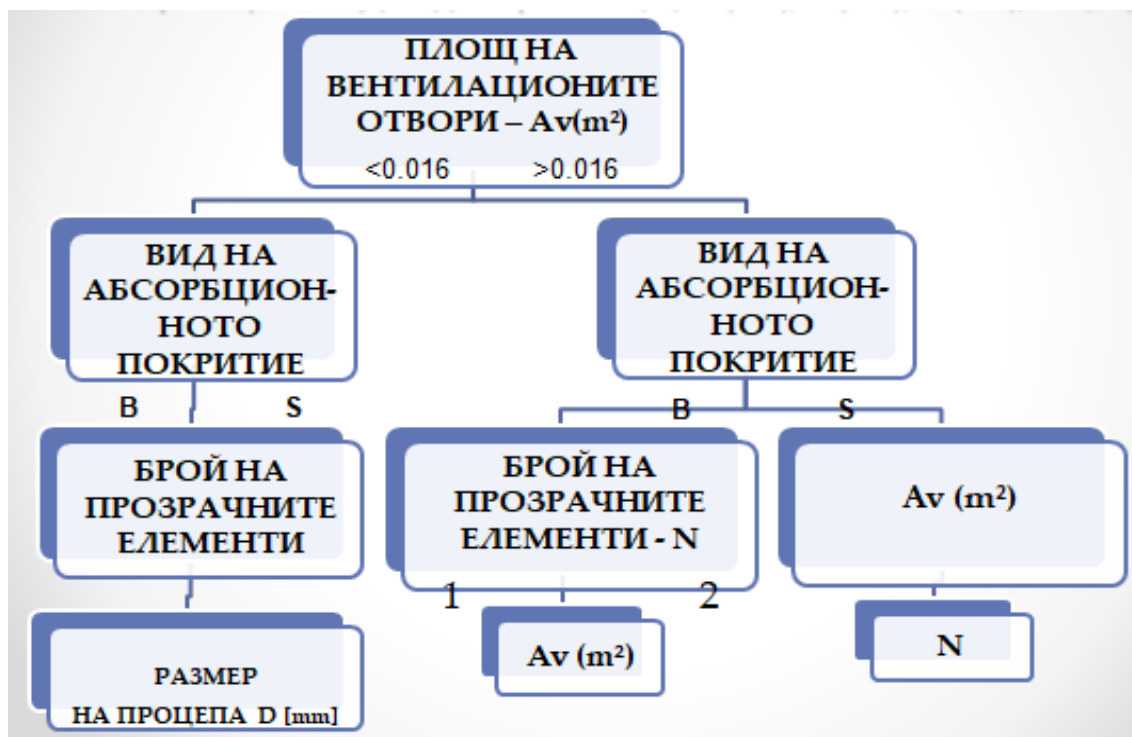
Рангът на значимост на факторите е показан на фиг.4-1 и фиг.4-2 съответно за режимите на принудена и естествена вентилация. Дебелина на акумулационната стена (L) практически не оказва влияние върху термичната ефективност за отворената стена на Тромб в режим непрекъсната естествена или принудена вентилация.

ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ ОТ ЧИСЛЕНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТИ

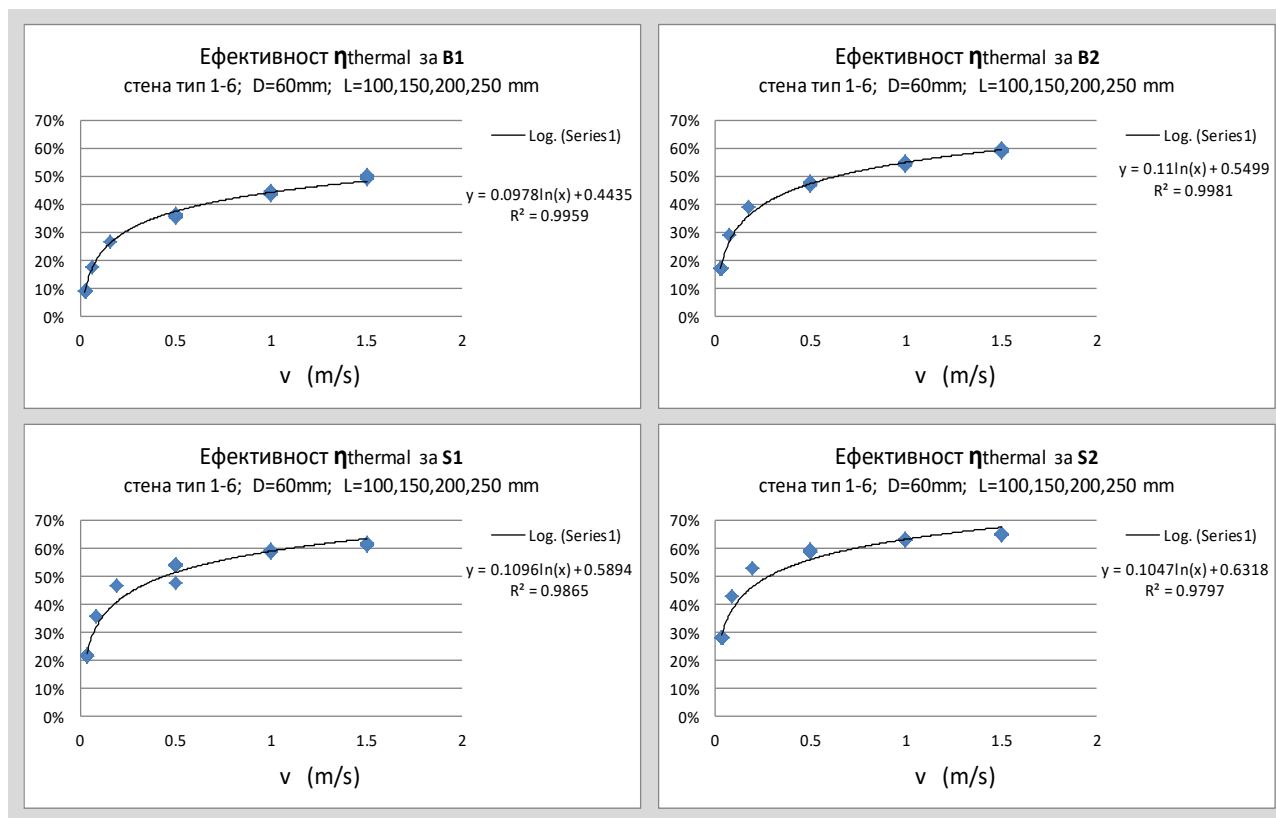
- Конструктивният материал на акумулиращият елемент (стена тип 1-6) не оказва съществено влияние.
- Дебелината на акумулиращия елемент не оказва съществено влияние.
- Най-добри резултати за ефективността са получени при разстояние $D=60$ mm.
- Значими фактори при принудена вентилация: вид на покритието и брой на прозрачните елементи; скорост на обдухване.
- Значими фактори при естествена вентилация: площ на вентилационните отвори; вид на покритието; брой на прозрачните елементи; разстояние D .
- Енергийната ефективност η_{thermal} зависи от скоростта на движение на въздуха, без значение, от какво е предизвикано това движение – механична сила или естествена конвекция, като тази зависимост има един и същ характер.



Фиг.4-1 (4.3.1.А-15а) Ранг на значимост на факторите при принудена вентилация



Фиг.4-2 (4.3.2A-16a) Ранг на значимост на факторите при естествена вентилация



Фиг.4-3 (4.3.3-1) Енергийната ефективност на отворена стена на Тромб при естествена и принудена вентилация - $\eta_{\text{thermal}} = f(v)$

НАТУРНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ ПРИ ЕСТЕСТВЕНА И ПРИНУДЕНА ВЕНТИЛАЦИЯ

Експерименталният модул „отворена стената на Тромб“ е с габаритни размери височина 2.68 m и ширина 1.84 m вертикално разделена термично и аеродинамично, което обособява две самостоятелни секции, bp - с абсорбиращо покритие черна акрилна боя и sc - със селективно покритие - медно фолио с черен хром. Всяка от секциите е с размери 2.15m x 0.72m, като в горния и долния им край, по цялата ширина на конструкцията, е монтиран специален профил с подвижна клапа, осигуряваща процеп за вход/изход на въздух. Сензори за температура са монтирани на височина 1.94; 1.50; 1.08; 0.65; 0.22m по вертикалните оси на всяка от секциите, 2 броя - симетрично разположени на хоризонтално ниво 0.65m.

Конструкция на стената			Материал на стената			
Наклон	β	90°	Дебелина на стената	Lp	0.25	m
Азимут	φ	0°	Коеф.на топлопроводност	λ	2.7	kJ/(hr.mK)
Височина и ширина на модула	H x W	2.15 x 0.72 m	Спец. обемен топл.капац.	ср	1522	kJ/(m ³ K)
Брой на прозр. елементи	N	2	Вид на покритието 1	bp	емайллак	черен мат
Разстояние между остъкления и стената D		0.07 m	Вид на покритието 2	sc	медно	кадмирано
Енергопроп. на елемента	g_{gl}	0.8	Поглъщ. способност	$\alpha_{s,w}$	bp 0.96	sc 0.95
Излъчвателна способност	ϵ_{gl}	0.84	Излъчвателна способност	ϵ_w	bp 0.87	sc 0.11

Табл.4-1 (4.4-1) Параметри на експерименталната отворена стена на Тромб

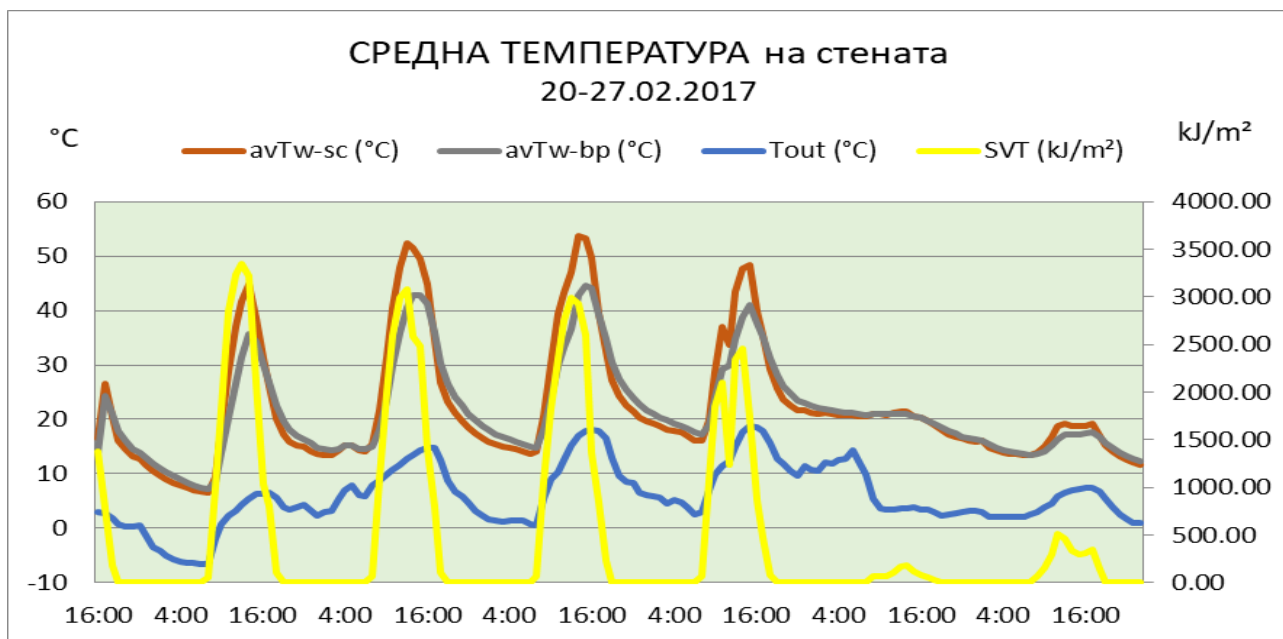
ПЕРИОД 2017 год.	РЕЖИМ на работа	ДАННИ от климатичната станция		ТЕМПЕРАТУРНО ПОЛЕ НА СТЕНАТА		ПАРАМЕТРИ НА ВЪЗДУХА	
				Θ_w-sc	Θ_w-bp	средна скорост	средна температура
08.02 до 12.02	естествена конвекция	Θ_{out} (°C)	SVT (kJ/m ²)	2 x 7 точки		Vsc (m/s) Vbp (m/s)	Θ_{sc} (°C) Θ_{bp} (°C)
12.02 до 20.02	естествена конвекция	Θ_{out} (°C)	SVT (kJ/m ²)	-		Vsc (m/s) Vbp (m/s)	Θ_{sc} (°C) Θ_{bp} (°C)
20.02 до 27.02	естествена конвекция	Θ_{out} (°C)	SVT (KkJ/m ²)	2 x 7 точки		Vsc (m/s) Vbp (m/s)	Θ_{sc} (°C) Θ_{bp} (°C)
10.03 до 04.04	принудена вентилация	Θ_{out} (°C)	SVT (kJ/m ²)	2 x 4 точки		Vsc (m/s) Vbp (m/s)	Θ_{sc} (°C) Θ_{bp} (°C)

Табл.4-2 (4.4-2) Режими на работа и измервани параметри

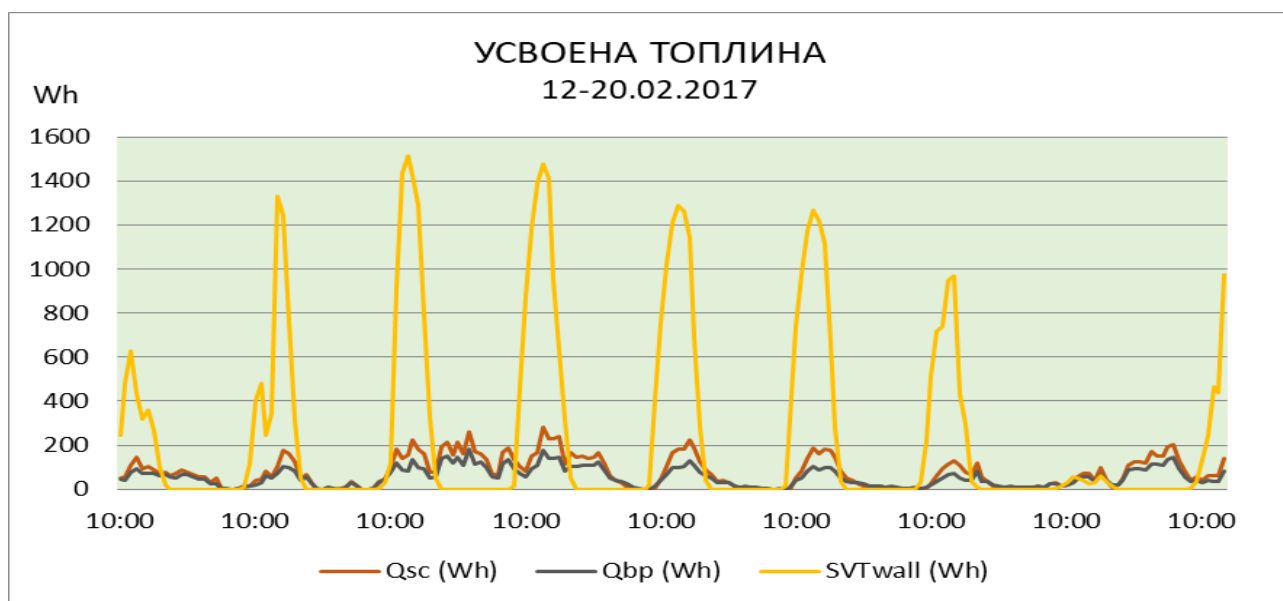
Във вентилационните канала към помещението са разположени по 2 броя комбинирани сензори за скорост и температура. Стойностите от измерванията са записвани автоматично на всеки 5 минути и усреднени по часове, в съответствие със скоростния и температурен профили във въздуховода. Параметрите на стената са дадени в табл.4-1. Измерванията са направени в 4 времеви интервала за 2 режима на работа – естествена и принудена вентилация, както е показано в табл.4-2.

ЕСТЕСТВЕНА ВЕНТИЛАЦИЯ

В следствие на естествената конвекция по стената се формира вертикален възходящ поток, като дебитът е в пряка зависимост от температурата на стената, температурата на помещението и външната температура. Температурата на подавания в помещението въздух е в правопрпорционална зависимост от температурата на стената (определяща за



Фиг.4-4 (4.4.1.3-3) Средна температура на стената за периода



Фиг.4-5 (4.4.1.2-4) Степен на усвояване на топлината от слънцето

отдадената топлина) и обратно пропорционална на температурата на външния въздух и дебита. Количеството топлина, отдадено от стената към подавания в помещението въздух за един час се изчислява по следната формула:

$$Q_v = C_p \cdot \dot{m}_v \cdot \Delta\theta_a \quad \text{kWh} \quad (4-1)$$

C_p – специфичен топлинен капацитет на въздуха (kJ/kg°C)

$\dot{m}_v$ – масов дебит на въздуха (kg/h)

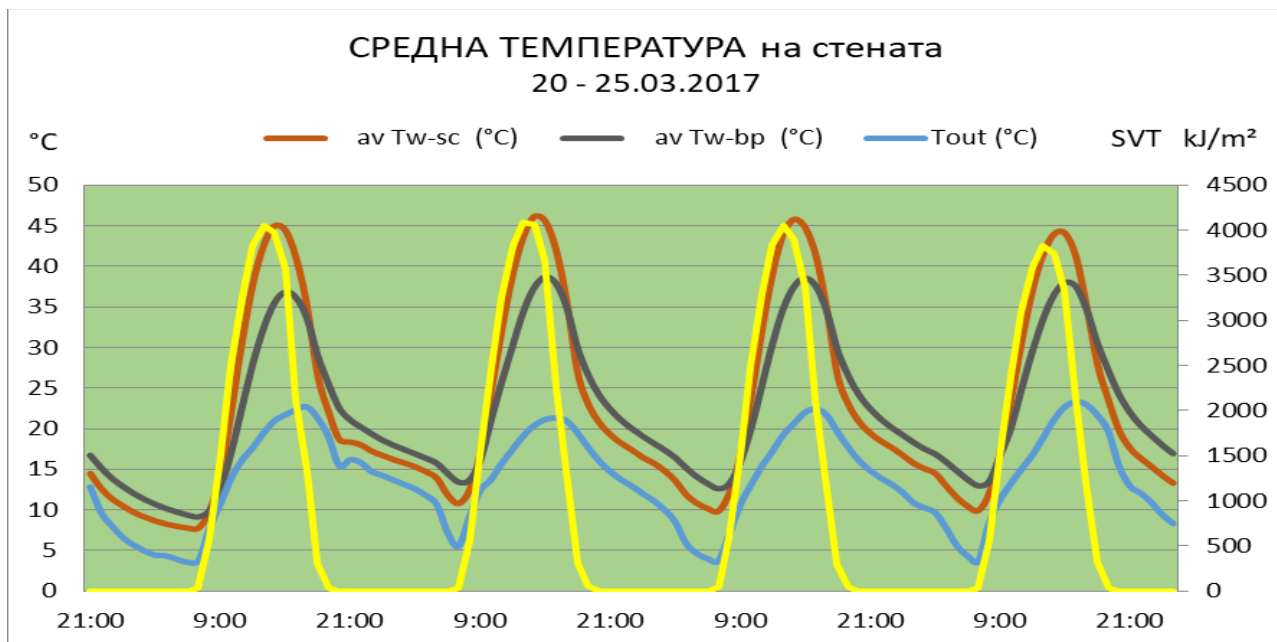
$\Delta\theta_a$ – температурна разлика между входящия в помещението и външния въздух (°C).

Енергийна ефективност на процеса за разглеждан период е:

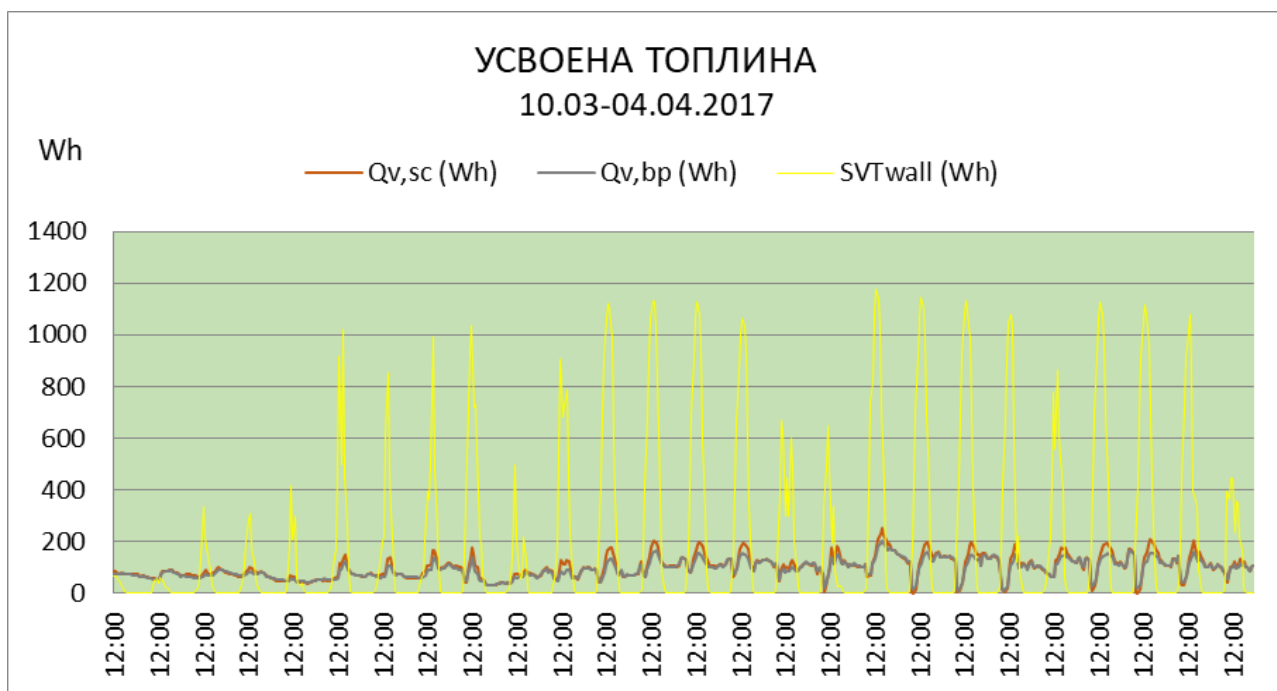
$$\eta_{\text{thermal}} = \frac{\sum Q_v}{\sum \text{SVTwall}} \quad \% \quad (4-2)$$

ΣQ_v kWh – общото количество топлина преминало във вентилационния въздух
 ΣSVT_{wall} kWh - общото за периода количество слънчева енергия за цялата стена

Средната температура на двете секции на стената за един от периодите е показана на фиг.4-4. Усвоената за друг период топлина е показана на фиг.4-5, където е направена съпоставка с падналата върху стената слънчева енергия.



Фиг.4-6 (4.4.2-4) Средна температура на стената за период с интензивно слънчево греење



Фиг.4-7 (4.4.2-8) Степен на усвояване на топлината от слънцето

ПРИНУДЕНА ВЕНТИЛАЦИЯ

За разлика от естествената вентилация, където движещата сила е вътрешна за системата и е следствие на естествената конвекция, то при принудената вентилация тя е външна, най-често механична. Всяка от секциите има вентилационен отвор през акумулиращата стена, в който – откъм страната на помещението – са монтирани два броя еднотипни вентилатора (ф150; максимални дебит 180 m³/h; напор 110 Pa; ел.мощност 30W) с общ регулатор на мощността (оборотите). На фиг.4-6 са показани средните температури на двете секции на стената за период с интензивно греење, а на фиг.4-7 – усвоената за целия период топлина.

ОБООБЩЕНИ РЕЗУЛТАТИ ОТ НАТУРНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТИ

Паралелно с натурните експерименти са проведени и числени такива при параметрите на реалната стена, но със заложените в TRNSYS параметри на климата. Обобщените резултати за естествена вентилация (период 8-27.02) и резултатите за принудена вентилация (10.03-04.04) са показани в табл.4-3 и табл.4-4 съответно за bp и sc.

ОБООБЩЕНИ РЕЗУЛТАТИ от числени и натурни експерименти			08.02-27.02 - bp		10.03-04.04 - bp	
естествена/принудена вентилация			естествена	вентилация	принудена	вентилация
bp - покритие черна боя			числен	натурен	числен	натурен
ТЕМПЕРАТУРА НА ПОДАВАНИЯ ВЪЗДУХ	θ_v	°C	13.3	18.1	10.7	15.3
ВЪНШНА ТЕМПЕРАТУРА	θ_e	°C	1.1	2.2	6.8	9.4
СУМАРНА СЛЪНЧЕВА ЕНЕРГИЯ за стената	$\Sigma Q_{sol,w}$	kWh	69.6	92.7	86.8	123.4
ПЪЛНА СЛЪНЧЕВА РАДИАЦИЯ	Q_{sol}	Wh/m ²	106.7	135.1	91.7	138.4
СУМАРНА ТОПЛИНА ЗА ВЕНТИЛАЦИЯ	$\Sigma Q_{v,bp}$	kWh	20.3	23.8	37.1	51.7
ДЕБИТ НА ВЪЗДУХА - масов	$\dot{m}_{av}$	kg/h	12.7	13.5	56.6	52.6
ДЕБИТ НА ВЪЗДУХА - обемен	V_{av}	m ³ /h	10.2	10.8	45.3	42.1
СКОРОСТ на обдухване на стената	$v_{w,av}$	m/s	0.056	0.060	0.250	0.232
ТЕРМИЧНА ЕФЕКТИВНОСТ	$\eta_{thermal}$	%	29.2%	25.7%	42.7%	41.9%

Табл.4-3 (4.4.3-3) Обобщени резултати от числените и натурни експерименти - естествена и принудена вентилация, bp

При анализа на резултатите и изводи за предимствата и недостатъците на режимите на естествена и принудена вентилация е редно да се отчетат разхода на енергия за осъществяване на принудената вентилация. В табл.4-5 са показани редуцираните резултати за двата режима, като е видно, че резултатите им за термичната ефективност се сближават до разлики в рамките на 6%. Същевременно е видна голямата разлика в получения дебит въздух в полза на принудената вентилация, същевременно по-малката температурна разлика на заграяване на външния въздух до подаването му в помещението.

ОБООБЩЕНИ РЕЗУЛТАТИ от числени и натурни експерименти			08.02-27.02 - sc		10.03-04.04 - sc	
естествена/принудена вентилация			естествена	вентилация	принудена	вентилация
sc - селективно покритие			числен	натурен	числен	натурен
ТЕМПЕРАТУРА НА ПОДАВАНИЯ ВЪЗДУХ	θ_v	°C	17.8	18.4	11.0	14.6
ВЪНШНА ТЕМПЕРАТУРА	θ_e	°C	1.1	-0.6	6.8	9.4
СУМАРНА СЛЪНЧЕВА ЕНЕРГИЯ за стената	$\Sigma Q_{sol,w}$	kWh	69.6	92.7	86.8	123.4
ПЪЛНА СЛЪНЧЕВА РАДИАЦИЯ	Q_{sol}	Wh/m ²	106.7	135.1	91.7	138.4
СУМАРНА ТОПЛИНА ЗА ВЕНТИЛАЦИЯ	$\Sigma Q_{v,sc}$	kWh	26.0	30.5	50.3	61.1
ДЕБИТ НА ВЪЗДУХА - масов	$\dot{m}_{av}$	kg/h	13.5	15.7	69.7	72.1
ДЕБИТ НА ВЪЗДУХА - обемен	V_{av}	m ³ /h	10.8	12.5	55.7	57.7
СКОРОСТ на обдухване на стената	$v_{w,av}$	m/s	0.059	0.069	0.307	0.318
ТЕРМИЧНА ЕФЕКТИВНОСТ	$\eta_{thermal}$	%	37.3%	32.9%	57.9%	49.6%

Табл.4-4 (4.4.3-4) Обобщени резултати от числените и натурни експерименти - естествена и принудена вентилация, sc

РЕДУЦИРАНИ РЕЗУЛТАТИ от натурните експерименти			08.02-27.02 - bp		10.03-04.04 - bp	
естествена/принудена вентилация			естествена вентилация		принудена вентилация	
bp/sc			bp	sc	bp	sc
ПЪЛНА СЛЪНЧЕВА РАДИАЦИЯ	Q_{sol}	Wh/m ²	135.1	135.1	138.4	138.4
СУМАРНА СЛЪНЧЕВА ЕНЕРГИЯ за стената	$\Sigma Q_{sol,w}$	kWh	92.7	92.7	123.4	123.4
СУМАРНА ТОПЛИНА ЗА ВЕНТИЛАЦИЯ	$\Sigma Q_v, bp$	kWh	23.8	30.5	51.7	61.1
ДЕБИТ НА ВЪЗДУХА - масов	$\dot{m}_{av}$	kg/h	13.5	15.7	52.6	72.1
ДЕБИТ НА ВЪЗДУХА - обемен	V_{av}	m ³ /h	10.8	12.5	42.1	57.7
СКОРОСТ на обдухване на стената	$v_{w,av}$	m/s	0.060	0.069	0.232	0.318
ТЕМПЕРАТУРНА РАЗЛИКА НА ВЪЗДУХА	$\Delta \theta_v$	°C	15.9	19.0	6.0	5.2
ТЕРМИЧНА ЕФЕКТИВНОСТ	$\eta_{thermal}$	%	25.7%	32.9%	41.9%	49.6%
използвана външна енергия (621 h x 20 W)	ΣE_v	kWh	0	0	12.4	12.4
реално спечелена енергия	ΔE	kWh	23.8	30.5	39.3	48.7
редуцирана (реална) ефективност	η^R_{therma}	%	25.7%	32.9%	31.8%	39.5%

Табл.4-5 (4.4.3-5) Редуцирани резултати от натурните експерименти – естествена и принудена вентилация; bp и sc варианти

ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ ОТ НАТУРНИТЕ ЕКСПЕРИМЕНТИ

- Натурните експерименти потвърдиха адекватността на симулационните модели в TRNSYS и достоверността на резултатите от числените експерименти;
- Конструкцията със селективно покритие е по-ефективна от тази с боядисан с черна боя абсорбер в рамките на 6% (2-3% по-малко, отколкото при идеалния случай на числените експерименти); При принудена вентилация резултатите за дебита и усвоената топлина са значително по-добри, като термичната ефективност (отчитайки потребената енергия) е в рамките на 6% по-висока;
- Високите дебита, които постига принудената вентилация, са напълно постижими от естествената вентилация при $Av/Aw = 0.09$ за bp и 0.07 за sc;
- Естествената конвекция е саморегулиращ се физически процес, при който дебита на въздуха се определя от слънчевото греење, не изисква външна енергия и е практически безшумна. Всичко това е предпоставка за приоритетно използване на естествената вентилация при режим „подаване на външен въздух“.

ГЛАВА 5. ОЦЕНКА НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ОТВОРЕНА СТЕНА НА ТРОМБ

БАЗОВ МОДЕЛ

Моделът е базиран на симулации в TRNSYS за периода от ноември до март за климатична зона София - Зона 5 по класификацията на ASHRAE. Обобщени са по месеци почасови резултати за:

$\theta_e (\theta_e)$ [°C] - външна температура;

$\theta_w (\theta_1)$ [°C] - средна температура на акумулиращата повърхност;

$\theta_v (\theta_{out})$ [°C] - температура на постъпващия в помещението въздух;

Q_{sol}^* (Q_{total}) [kWh] - енергията на пълното слънчево облъчване на повърхността на стената за коментирания период;

Q_v (Q_{ve}) [kWh] - усвоена от въздуха топлина (за периода);

$\dot{m}$ ($\dot{m}_{al}$) [kg/h] – среден масов дебит на въздуха преминаващ през стената;

Изчислени са параметрите:

$\eta_{thermal} = Q_v / Q_{sol}$ [%];

$\dot{m}$ [kg/h] - средния за месеца масов дебит на въздуха;

Q_v [kWh] - усвоената от въздуха топлина (за периода);

Намерени са зависимости:

$$\dot{m}^* = f(Q_{sol}; A_v/A_w) \quad (5-1)$$

$$\eta_{thermal} = f(v; Q_{sol}) \quad (5-2)$$

$\dot{m}^*$ (kg/h.m²) - дебит на въздуха за 1 m² площ на стената: $\dot{m}^* = \dot{m}/W$ (kg/h.m²)

A_v/A_w - безразмерен фактор

A_v (m²) - площ на отворите (по-малката от входящата и изходящата)

A_w (m²) - площ на стената, $A_w = H.W$ (m²)

v (m/s) - скорост на движение на въздуха, $v = \dot{V}/A_g$ (m/s), където:

$\dot{V}$ (m³/s) - обемен дебит на въздуха, $\dot{V} = \dot{m}/3600.\rho_v$

A_g (m²) – площ на процепа, в който се движи въздуха $A_g=W.D$ (m²)

$\Delta\Theta_v$ (°C) - температурна разлика на вентилационния въздух $\Delta\Theta_v = \Theta_v - \Theta_e$ (°C)

$\Delta\Theta_a$ (°C) - температурна разлика на въздуха вътре-вън $\Delta\Theta_a = \Theta_{int} - \Theta_e$ (°C)

v (m/s) - скорост на обтичане на стената

Базови параметри на моделаите:

- Местоположение – гр.София;
- Небесна ориентация – юг; наклон 90°; азимут 0°; без външно засенчване;
- материал на акумулиращия елемент – силикатна тухла (табл.3.4-3);
- дебелина на акумулиращия елемент – $L = 240$ mm;
- прозрачен елемент: двойно остъкление $g_{gl}=0.8$; $\epsilon_{gl}=0.84$;
- разстояние между прозрачния елемент и стената $D=0.060$ m;
- изолация $\delta=0.150$ m; $\lambda=0.032$ W/m.K.

Вариран фактори:

- среден интензитет на пълната слънчева радиация по вертикални повърхности с ориентация юг – Q_{sol} , W/m²;
- средна външна температура - Θ_e (Твн), °C;
- площ на стената: $A_w = 2; 3; 4$ m²;
- височина $H = 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 3.5; 4.0$ m;
- широчина $W = 0.5; 0.57; 0.67; 0.80; 1.0; 1.33; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 4.0$ m; $W = A_w/H$ m;
- площ на вентил. отвори A_v (m²): 0.017663; 0.035325; 0.07065; 0.2; 0.2826; 0.5 m²
- разстояние между вентил. отвори $H_v = H - A_v/W$ (m)
- вид на покритието – **bp** (черна боя); **sc** (селективно покритие)

Базов дебит $\dot{m}^{b*}$ (kg/h) и базова ефективност $\eta^{bthermal}$ (%)

Направени са примерни графики на решения на (5-1b-bp), (5-1b-sc), (5-2b-bp) и (5-2b-sc), като на фиг.5-1 и фиг.5-2 са показани съответните за височина на стената 2.0 метра - вариант с покритие черна боя и селективно покритие.

Намерени са апроксимационни зависимости за всяка височина на стената H (m), отделно за покритие с черна боя (bp) и за селективно покритие (sc), по месеци от ноември до март, като критериите, за да бъде избрано едно или друго уравнение са следните: запазване вида на уравнението при всички извадки за различните височини на стената (това гарантира равномерност на полето при гранични стойности); запазване достатъчно висока точност при всички извадки; максимални отклонения на решението от действителните стойности да са в предварително определени граници.

$$\dot{m}^{b*bp,i} = f(Q_{sol,i}; A_v/A_w) \text{ (kg/h.m}^2\text{)}; \quad (5-1b-bp)$$

$$\dot{m}^{b*sc,i} = f(Q_{sol,i}; A_v/A_w) \text{ (kg/h.m}^2\text{)} \quad (5-1b-sc)$$

$$Z = a+b.X+c.\ln(Y)+d.X^2+ e. \ln(Y)^2+f.X.\ln(Y)+g.X^3+h.\ln(Y)^3+i.X.\ln(Y)^2+j.X^2.\ln(Y)]$$

Коефициентите (a,b,c,d,e,f,g,h,i, j) – са различни за всяко H (m) и покритие bp, sc

$Z \equiv \dot{m}^{b*i}; X \equiv Q_{sol,i}; Y \equiv (A_v/A_w);$

i – индекс означаващ месеците от ноември до март (nove; dec; jan; feb; mar)

$$\eta^{b_{thermal, bp-i}} = f(v_{bp-i}; Q_{sol,i}) \quad (5-2b-bp)$$

$$Z = a + b \cdot \ln(X) + c \cdot Y + d \cdot (\ln(X))^2 + e \cdot Y^2 + f \cdot Y \cdot \ln(X) + g \cdot (\ln(X))^3 + h \cdot Y^3 + i \cdot Y^2 \cdot \ln(X) + j \cdot Y \cdot (\ln(X))^2$$

Коефициентите ($a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$) са различни за всяко $H(m)$

$$Z \equiv \eta^{b_{thermal,i}}; X \equiv v_{bp-i}; Y \equiv (A_v/A_w);$$

i – индекс означаващ месеците от ноември до март (nove; dec; jan; feb; mar)

$$\eta^{b_{thermal, sc-i}} = f(v_{sc-i}; Q_{sol,i}) \quad (5-2b-sc)$$

$$Z = a + b/X + c \cdot \ln(Y) + d/X^2 + e \cdot (\ln(Y))^2 + f \cdot \ln(Y)/X + g/X^3 + h \cdot (\ln(Y))^3 + i \cdot (\ln(Y))^2/X + j \cdot \ln(Y)/X^2$$

Коефициентите ($a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$) са различни за всяко $H(m)$

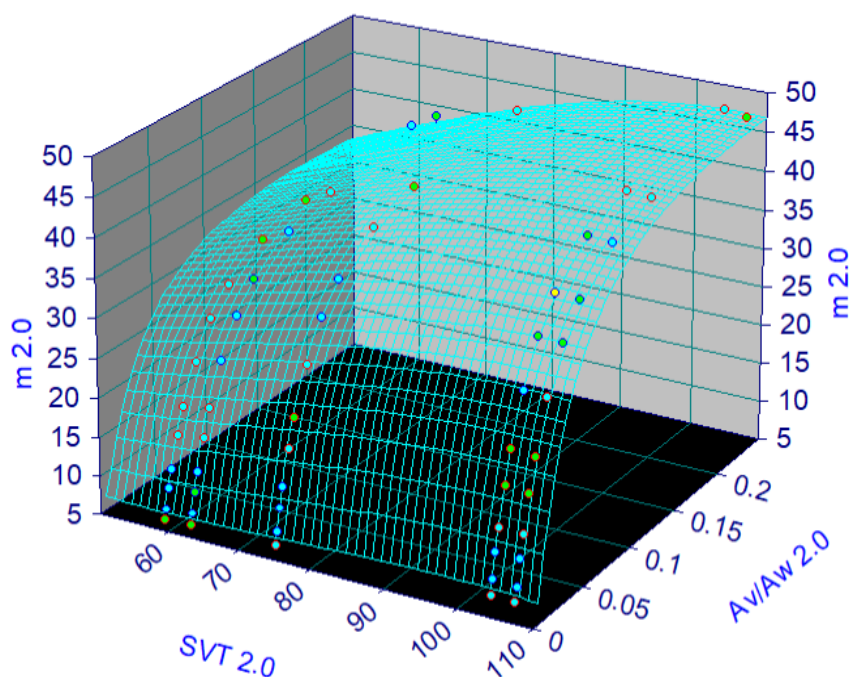
$$Z \equiv \eta^{b_{thermal,i}}; X \equiv v_{sc-i}; Y \equiv (A_v/A_w);$$

i – индекс означаващ месеците от ноември до март (nove; dec; jan; feb; mar)

Съставени са графики на решенията за (1b-bp), (1b-sc), (2b-bp), (2b-sc) за всеки от месеците от периода ноември – март, като примери са показани на фиг.5-3 и фиг.5-4, а пълният набор е в Приложение 1 от дисертацията.

Отчитане на влиянието на “D” и ориентацията на стената

При създаване на Базовия модел са използвани геометрично различни конфигурации с $D=60mm$ и ориентация юг. За да бъде проверено влиянието на тези параметри върху модела е направена извадка от конфигурациите за всяко $H=0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0; 3.5$ и $4.0m$, за които A_v/A_w е в диапазона 0.01 до $0.1m$ (по 325 броя за всяко покритие).



Фиг.5-1 (5.1.2-2) Тримерна графика на $\dot{m}^* = f(Q_{sol}; A_v/A_w) - bp$, $H=2.0m$

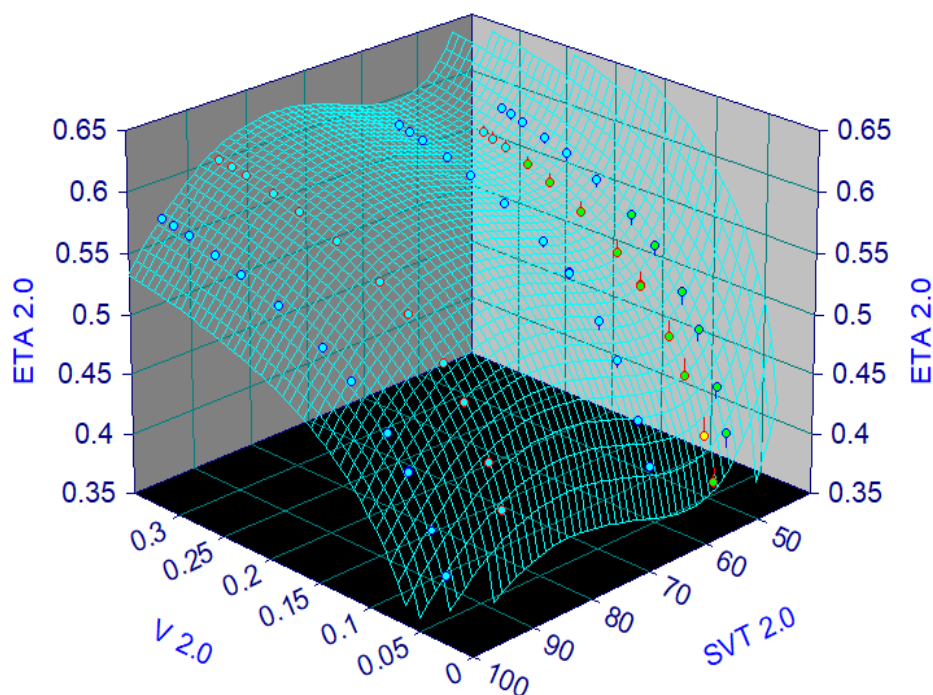
Конфигурациите са симулирани за bp и sc при $D=50; 60; 70mm$ (ориентация юг), като вариантът с $D=60mm$ се приема за базов, след което са вариран ориентации изток и запад (при $D=60mm$), където за база е приета ориентация „юг“.

$$\dot{m}^b = K_{m,D} \cdot K_{m,\psi} \cdot \dot{m}^{b*} \cdot A_w \quad (\text{kg/h})$$

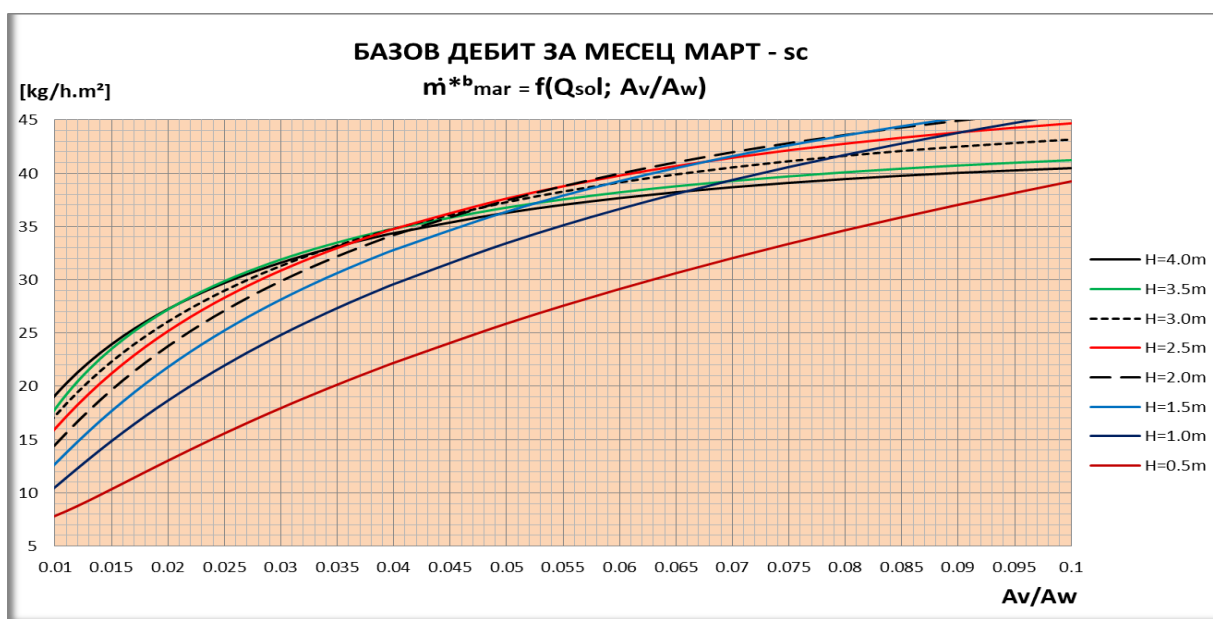
$$\eta_{\text{thermal}} = f(v; Q_{\text{sol}}) = K_{\eta,D} \cdot K_{\eta,\psi} \cdot \eta^{b*}_{\text{thermal}} \quad \%$$

$$K_{m,D} = f(D; A_v/A_w); \quad K_{m,\psi} = f(Q_{\text{sol}}/Q^b_{\text{sol}}); \quad K_{\eta,D} = f(A_v/A_w); \quad K_{\eta,\psi} = f(Q_{\text{sol}}/Q^b_{\text{sol}})$$

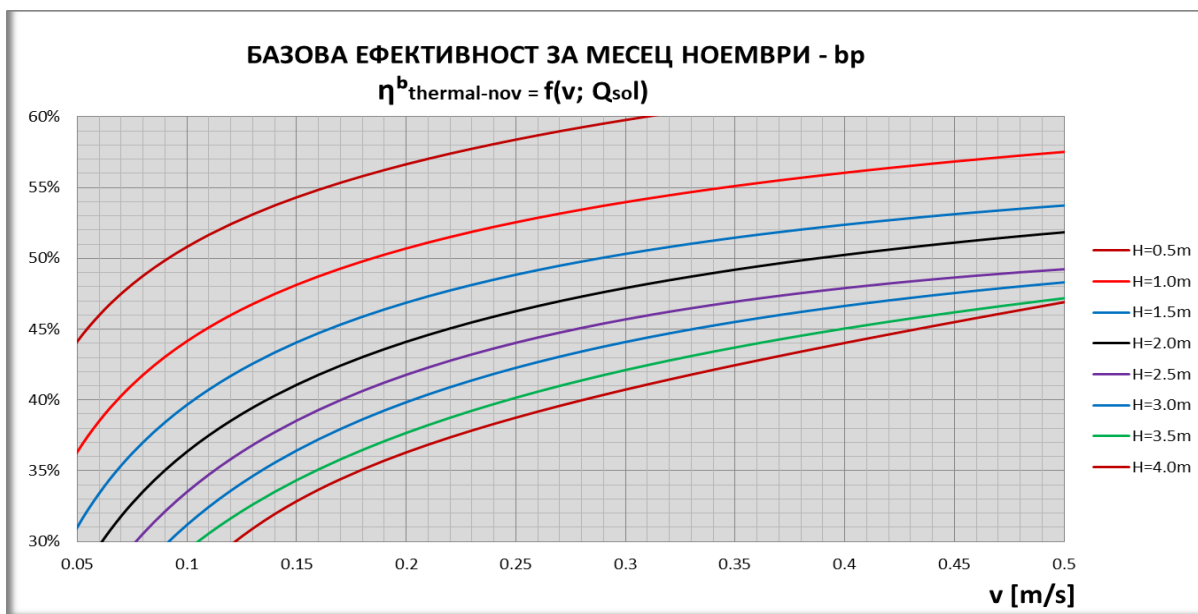
Стойностите на корекционните коефициенти $K_{m,D}$ и K_{η} ; $K_{\eta,D}$ и $K_{\eta,\psi}$ са показани съответно на табл.5-1 и табл.5-2.



Фиг.5-2 (5.1.2-10) Тримерна графика на $\eta_{\text{thermal}} = f(v; Q_{\text{sol}})$ – sc, $H=2.0\text{m}$



Фиг.5-3 (5.1.2-6) Графика за определяне на $\dot{m}^{b*}_{sc}$ за месец март



Фиг.5-4 (5.1.2-11) Графика за определяне на $\eta^b_{\text{thermal,br}}$ за месец ноември

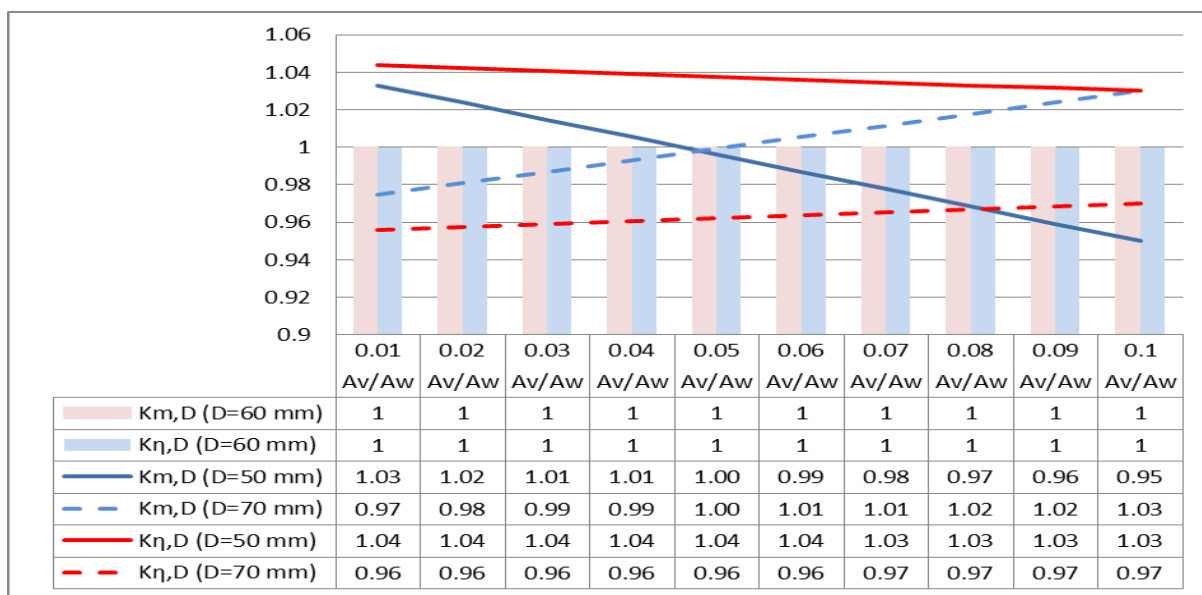
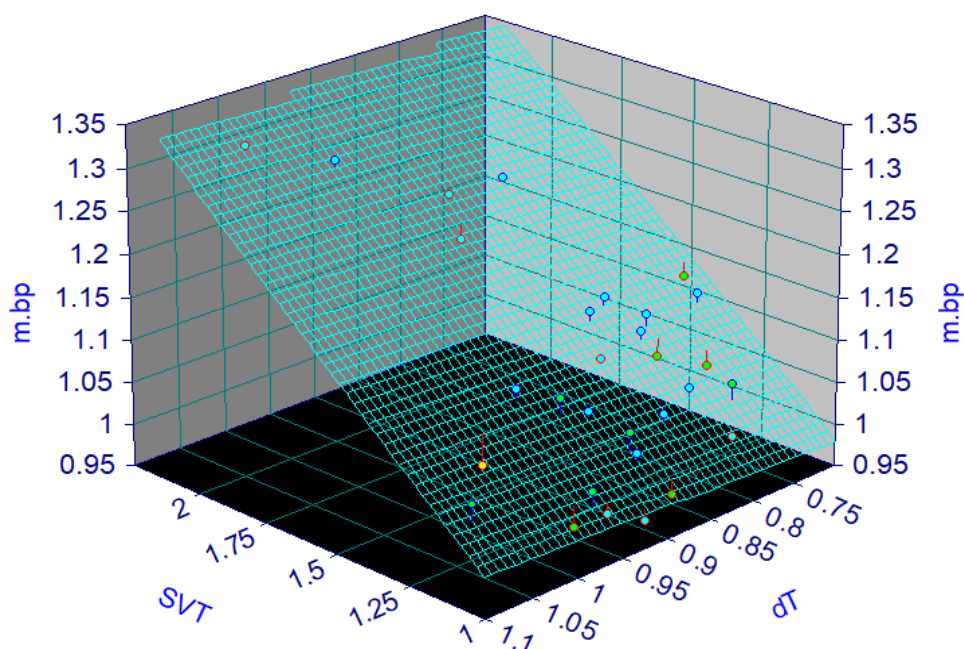


Табл.5-1 Корекционни коефициенти $K_{m,D}$ и $K_{\eta,D}$

bp, sc	noe	dec	jan	feb	mar
$K_{m,\psi-1}$	0.909	0.921	0.955	0.911	0.905
$K_{\eta,\psi-1}$	0.989	0.991	0.995	0.990	0.989
$K_{m,\psi-2}$	0.911	0.905	0.909	0.921	0.955
$K_{\eta,\psi-2}$	0.990	0.989	0.989	0.991	0.995
$K_{m,\psi-3}$	0.911	0.906	0.909	0.920	0.953
$K_{\eta,\psi-3}$	0.990	0.989	0.989	0.991	0.995
$K_{m,\psi-4}$	0.913	0.907	0.909	0.924	0.952

K _{η,ψ-4}	0.990	0.989	0.989	0.991	0.994
K _{m,ψ-5}	0.911	0.906	0.909	0.921	0.953
K _{η,ψ-5}	0.990	0.989	0.989	0.991	0.995
K _{m,ψ-6}	0.910	0.904	0.904	0.919	0.950
K _{η,ψ-6}	0.990	0.989	0.989	0.991	0.994
K _{m,ψ-7}	0.915	0.909	0.910	0.923	0.952
K _{η,ψ-7}	0.990	0.989	0.990	0.991	0.994
K _{m,ψ-8}	0.910	0.904	0.904	0.919	0.950
K _{η,ψ-8}	0.990	0.989	0.989	0.991	0.994
K _{m,ψ-9}	0.909	0.903	0.904	0.919	0.948
K _{η,ψ-9}	0.989	0.989	0.989	0.991	0.994

Табл.5-2 (5.1.3-3) Корекционни коефициенти за ориентация „изток“ и „запад“ по климатични зони (валиден за стени bp и sc, при база „юг“)



Фиг.5-5 (5.2.2-1) Тримерна графика за определяне на $K_{m,z-bp}=f(CQsol; C\Delta\Theta_a)$

РАЗШИРЕН МОДЕЛ

Създаден на базата на резултати от числени симулации в TRNSYS (при базови и вариращи фактори на моделите идентични на Базовия модел) за градовете Варна, Плевен, Сандански и Пловдив. От получените резултати от числовите симулации за всеки от изследваните месеци (ноември, декември, януари, февруари, март) са изчислени следните коефициенти (за всяка една от симулациите):

$$K_{m,z} = \frac{\dot{m}_z}{\dot{m}^b} \quad - \text{коефициент на дебита}$$

$\dot{m}_z$ kg/h – среден масов дебит на въздуха за съответната зона (град)

$\dot{m}^b$ kg/h – среден масов дебит на въздуха за базовата зона (София)

$$K_{\eta,z} = \frac{\eta_{\text{thermal},z}}{\eta^{\text{bthermal}}} - \text{коэффициент на ефективността}$$

$\eta_{\text{thermal},z}$ % - термична ефективност за съответната зона (град)

η^{bthermal} % - термичната ефективност за базовата зона (София)

Масивите от стойности $K_{m,z}$ и $K_{\eta,z}$ за всеки отделен месец са обработени до получаване на зависимост за всяка от зоните (градовете), като получените резултати имат следния вид:

$$K_{m,z} = f(P_{Q\text{sol}}; P_{\Delta T_a}) \quad (5-3)$$

$$K_{\eta,z} = f(K_{m,z}; C_{Q\text{sol}}) \quad (5-4)$$

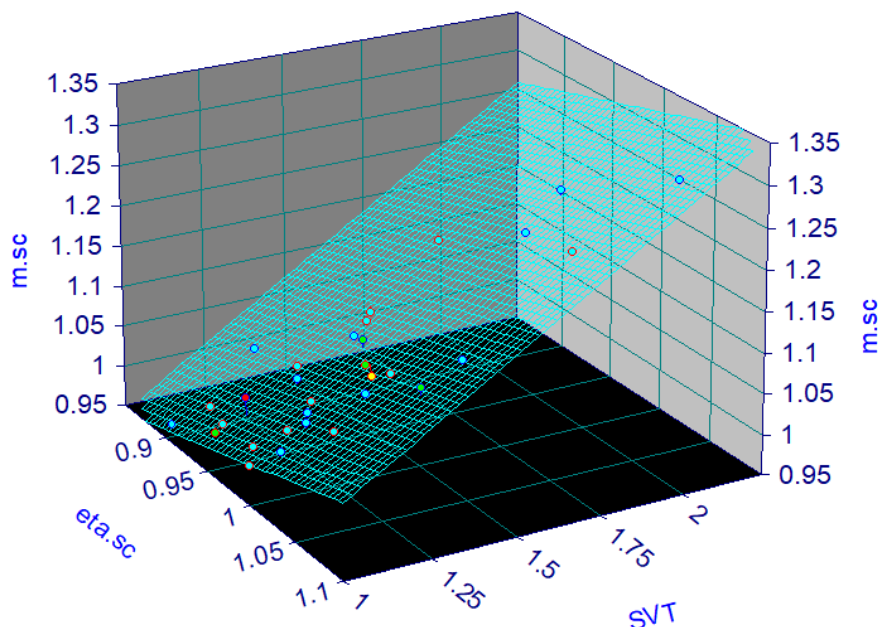
$$P_{Q\text{sol}} = Q_{\text{sol}} / Q^{\text{b sol}}$$

$$P_{\Delta \theta_a} = \Delta \theta_a / \Delta \theta^{\text{b a}}$$

$\Delta \theta_a$ (°C) – температурна разлика на външния въздух и въздуха в помещението

$$\Delta \theta_a = \theta_{\text{int}} - \theta_e \text{ (°C)},$$

Получени са решения на (5-3) и (5-4) за покритие с черна боя (bp) и за селективно покритие (sc). На фиг.5.2.2-1 е показана тримерната графика на избраното решение на (3) за bp, а на фиг.5.2.2-4 – тримерната графика на избраното решение на (4) за за sc.



Фиг.5-6 (5.2.2-4) Тримерна графика за определяне на $K_{\eta,z-sc} = f(K_{m,sc}; C_{Q\text{sol}})$

Корекционните коефициенти за дебита на въздуха и термичната ефективност:

$$K_{m,z} = a + b.(P_{Q\text{sol}}) + c.\ln(P_{\Delta T_a}) \text{ и}$$

$$K_{\eta,z} = d + e.(K_{m,z}) + f.(P_{Q\text{sol}}) \quad \text{са представени в табл. 5-3.}$$

Тестване на Разширения модел

Тестването на Разширения модел е извършено чрез числови симулации на отворена стена на Тромб в режим на естествена вентилация за градовете Чирпан и Кърджали, за които има заложи климатични данни в TRANSYS, но не са използвани при изграждането на Разширения модел. За целта са проиграни (избрани на случаен принцип) 15 варианти за стени, резултатите от които ни дават основание да приемем модела за достатъчно точен, тъй като за отделните месеци стойностите на корекционни коефициенти $K_{m,z}$ и $K_{\eta,z}$ за модела и симулациите се различават под 5%.

bp	nov	dec	jan	feb	mar	sc	nov	dec	jan	feb	mar
Km,b	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Km,b	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Kη,b	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Kη,b	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Km,1	1.01	1.03	1.04	0.97	0.94	Km,1	1.01	1.03	1.04	0.97	0.94
Kη,1	0.95	1.03	1.04	0.97	0.94	Kη,1	0.96	0.98	0.99	0.96	0.95
Km,2	1.02	1.04	1.04	0.97	0.94	Km,2	1.02	1.04	1.04	0.97	0.94
Kη,2	0.98	0.99	0.98	0.98	0.98	Kη,2	0.98	1.00	0.99	0.97	0.96
Km,3	1.00	1.00	1.01	0.97	0.94	Km,3	1.00	1.00	1.01	0.97	0.94
Kη,3	0.98	0.99	0.98	0.99	0.97	Kη,3	0.98	0.99	0.99	0.98	0.96
Km,4	0.98	1.02	1.05	0.95	0.96	Km,4	0.98	1.02	1.05	0.95	0.96
Kη,4	0.98	1.00	0.99	0.98	0.98	Kη,4	0.98	1.00	1.00	0.96	0.97
Km,5	1.03	1.05	1.06	1.00	0.96	Km,5	1.03	1.05	1.06	1.00	0.96
Kη,5	0.95	0.97	0.98	0.97	0.98	Kη,5	0.97	0.99	1.00	0.98	0.97
Km,6	1.10	1.15	1.22	1.04	1.00	Km,6	1.10	1.15	1.22	1.04	1.00
Kη,6	0.99	1.01	1.02	0.99	0.97	Kη,6	1.02	1.05	1.08	1.00	0.98
Km,7	0.98	0.98	1.03	0.97	0.98	Km,7	0.98	0.98	1.03	0.97	0.98
Kη,7	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	Kη,7	0.98	0.98	1.00	0.98	0.98
Km,8	1.09	1.15	1.22	1.04	1.00	Km,8	1.09	1.15	1.22	1.04	1.00
Kη,8	0.98	1.00	1.02	0.99	0.97	Kη,8	1.01	1.04	1.08	1.00	0.98
Km,9	1.13	1.20	1.27	1.05	0.93	Km,9	1.13	1.20	1.27	1.05	0.93
Kη,9	0.98	1.00	1.02	0.98	0.94	Kη,9	1.02	1.06	1.09	0.99	0.94

Табл.5-3 (5.3.1-2) Корекционни коефициенти Km,z и Kη,z по климатични зони.

ОБОБЩЕН МОДЕЛ

Обобщеният модел за оценка на параметрите на стена на Тромб в режим на естествена вентилация с подаване на външен въздух касае съоръжения ситуирани на територията на цялата страна, съобразно съществуващото климатично зонироване. За целта се изготвени графични и таблични материали въз основа на Базовия и Разширения модел.

МЕТОДИКА ЗА ОЦЕНКА НА ПАРАМЕТРИТЕ НА СТЕНА НА ТРОМБ

1. $\dot{m}^{b*}$ (kg/h.m²) - среден масов дебит на въздуха за 1 m² площ от стената (базов)

$$\dot{m}^{b*}=f(Q^{b\text{sol}}; A_v/A_w)$$

изчисляване по формули (1b-bp), (1b-sc) за всеки от месеците от периода ноември – март (отделно за bp и sc) или се отчита от графики (пример фиг.5.1.2-5 и фиг.5.1.2-6; пълен набор графики за всички месеци за всяко от покритията – Приложение 1)

2. $\dot{m}^b$ (kg/h) – среден масов дебит на въздух за стената (базов)

$$\dot{m}^b = K_{m,d}, K_{m,\psi}, \dot{m}^{b*} \cdot A_w \text{ (kg/h)}$$

Дебитът $\dot{m}^{b*}$ се отчита от графики по месеци (като тези от фиг.5-3 и фиг.5-4). Всички графики са дадени в Приложение 1 на дисертацията. Корекционните коефициенти Km,d и Km,ψ се отчитат от табл.5-1 и табл.5-2.

3. $\dot{m}$ (kg/h) – среден масов дебит на въздух за стената

$$\dot{m} = K_{m,z} \cdot \dot{m}^b \quad (\text{kg/h})$$

$$K_{m,z} = f(P_{Qsol}; P_{\Delta Ta}), \quad P_{\Delta Ta} = \Delta Ta / \Delta T^b_a,$$

ΔTa (°C) – температурна разлика на външния въздух и въздуха в помещението
 $\Delta Ta = T_{\text{пом}} - \Theta_e$ (°C);

$K_{m,z}$ се отчита за съответната климатична зона на България от табл.5-3 (по месеци, за всяко от покритията, като е прието $T_{\text{пом}}=20$ °C).

4. $\dot{V}$ (m³/s) - среден обемен дебит на въздух за стената

$$\dot{V} = \dot{m} / (3600 \cdot \rho_v) \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

ρ_v (kg/m³) – относително тегло на въздуха за средната между външната температура и температурата на подаване в помещението

5. v (m/s) - скорост на въздуха (на обтичане на стената)

$$v = \dot{V} / (D \cdot W) \quad (\text{m/s})$$

D (m) - разстояние между прозрачния елемент и стената

W (m) - ширина на стената

6. $\eta^{bthermal}$ (%) - термичната ефективност (базова)

$$\eta^{bthermal} = f(v; Q^{bsol})$$

изчислява се за всеки месец по уравненията (2b-bp) или (2b-sc), или се отчитат от графиките (пример фиг.5.1.2-11 и фиг.5.1.2-12 (пълният набор е в Приложение 1)).

7. $\eta^{thermal}$ (%) - термичната ефективност

$$\eta^{thermal} = K_{\eta,z} \cdot \eta^{bthermal} \quad (\%)$$

$$K_{\eta,z} = f(K_{m,z}; C_{Qsol}), \quad C_{Qsol} = Q_{sol} / Q^{bsol}$$

Корекционните коефициенти се отчитат за съответната климатична зона на България и съответния месец от табл.5-3.

8. Q_v (Wh) - усвоена от въздуха топлина - средно за час

$$Q_v = Q_{sol,z} \cdot \eta^{thermal} \cdot A_w \quad (\text{Wh})$$

9. Θ_v (°C) - температура на постъпващия в помещението въздух

$$\Theta_v = \Theta_e + Q_v / (3600 \cdot C_p \cdot \dot{m}) \quad (^\circ\text{C})$$

10. ΣQ_v (Wh) - усвоена от въздуха топлина за периода

$$\Sigma Q_v = Q_v \cdot N \quad (\text{Wh}), \quad N - \text{брой часове в месеца}$$

ГЛАВА 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисертацията е инспирирана от недостига на данни, анализи и надеждна информация по отношение на възможностите за използване на пасивните слънчеви системи в условията на България. Целта е да бъде оценен потенциала за приложение на отворена стена на Тромб в режим на подаване на външен въздух при климатичните условия на България и да бъде създадена методика за определяне на параметрите и характеристики на стената за периода ноември-март, позволяващи повишаване на енергийната ефективност и способстващи за решаване на проблема „симптоми на болната сграда“.

ОБОБЩЕНИЕ

Отворената стена на Тромб в режим на подаване на външен въздух е пасивна слънчева система, която успешно и енергийно ефективно може да решава проблемите с качеството на въздуха в затворени помещения. Термичната ѝ ефективност зависи преди всичко от скоростта на обдухване на стената, тоест от дебита, без значение дали е постигнат чрез естествена конвекция или принудена вентилация. Разумните дебети (осигуряващи осезаема температурна разлика на вентилационния въздух с външната температура) могат да бъдат постигнати и при естествена вентилация, което е за предпочитане, тъй като не се изисква външна енергия и липсва какъвто и да е шум, а процесът на естествена конвекция е саморегулиращ се и не изисква сложна автоматика. Стената може да бъде използвана за подаване на външен въздух и през месеците октомври и април (средноденонощните външни температури са по-ниски от проектните температури за помещенията), а в периода от май до септември - за отвеждане на въздух от помещението или за ограничаване на топлопритоците през ограждащите елементи.

Разработеният в дисертацията Обобщен модел за оценка на характеристиките на отворена стена на Тромб в режим подаване на външен въздух за климатичните условия на България в отоплителния период ноември – март притежава добри предиктивни възможности при високо ниво на точност. Методиката за оценка позволява съоръжението да бъде проектирано – бързо и лесно - при наличие единствено на общодостъпни климатични данни: среден интензитет на слънчевото греене и средна температура на въздуха за даден период. За целта могат да бъдат използвани набора от графики (Приложение 1, Приложение 2) или програмен продукт (Приложение 3).

ПРИЛОЖИМОСТ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Обобщеният модел за оценка на характеристиките на отворена стена на Тромб в режим подаване на външен въздух е напълно адекватен и достоверен за всички климатични зони на България. Рангът на значимост на параметрите на отворената стена на Тромб, изведен на базата структурно-параметричния анализ, е валиден за всички региони с умерен климат. Предварителната оценка за себестойността на различни конфигурации модули „Отворена стена на Тромб“ предназначени за фасаден монтаж, съпоставена със спестените средства за загряване на външния въздух, показват възможност за срок на откупуване на инвестицията в рамките на 3 до 4 години.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- Извършен е структурно-параметричен анализ на пасивен елемент „Отворена стена на Тромб“ и е получена нова база данни за енергийните характеристики и ефективността в различни режими на експлоатация при „принудена вентилация“ и „естествена вентилация“ за климатичните условия на Р.България. Резултатите от многофакторни числени моделни изследвания са потвърдени с такива от натурни изследвания, проведени на изграден за целите на изследването експериментален стенд в пасивна къща на експериментална площадка на ТУ-София.
- Формулирана е и е доказана хипотеза за зависимост на ефективността от скоростта на движение на въздуха в пространството между прозрачните и акумулиращи елементи, без значение от физическата причина за формиране на движението на въздуха - естествена конвекция при естествена вентилация или механична външна сила при принудена вентилация.
- Създаден е обобщен модел за оценка на енергийните характеристики на отворена стена на Тромб в режим подаване на външен въздух за климатичните условия на България в отоплителния период ноември – март, притежаващ добри предиктивни възможности при високо ниво на точност.
- Разработена е методика за оценка на ефективността на отворена стена на Тромб в режим подаване на външен въздух, която позволява решаване на проектната и проверочна задачи на пасивния елемент при наличие единствено на общодостъпни климатични данни: среден интензитет на слънчевото греене и средна температура на въздуха за даден период.
- Създаден е експериментален модел на отворена стена на Тромб и опитна установка, позволяващи бъдещи изследвания, обучения и водене на учебен процес.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

- Разработени са таблични и графични инженерни приложения.
- Разработен софтуерен продукт за автоматизирано приложение на методиката за оценка на ефективността на отворена стена на Тромб в режим подаване на външен въздух при решаване на проектната и проверочната задачи.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

- [1] Калоянов, Н., Г.Томов, Б.Станков., (2015) „Моделиране на топлопреносните процеси в отворена стена на Тромб“. Сборник Доклади на научната конференция ЕМФ'2015.
- [2] Калоянов, Н., Г.Томов, Б.Станков.,Л.Цоков., (2015) „Числено изследване на топлопреносните процеси в отворена стена на Тромб в режим „вентилация“.“ Сборник Доклади на научната конференция ЕМФ'2015.
- [3] Томов, Г., (2015) „Влияние на конструктивните параметри върху топлинната ефективност на стена на Тромб в режим „вентилация“ Сборник Доклади на научната конференция ЕМФ'2015.
- [4] Томов, Г., Б. Станков, Н. Калоянов., (2016) „Числено изследване на термичната ефективност на отворена стена на Тромб в непрекъснат режим на принудена вентилация.“ Сборник доклади от XXI Научна конференция с международно участие ЕМФ'2016 .
- [5] Томов, Г., Б. Станков, Н. Калоянов., (2016) „Числено изследване на термичната ефективност на отворена стена на Тромб в непрекъснат режим на естествена вентилация.“ Сборник доклади от XXI Научна конференция с международно участие ЕМФ'2016 .
- [6] Томов, Г., Б. Станков, Н. Калоянов., (2017) „Натурно изследване на термичната ефективност на отворена стена на Тромб в непрекъснат режим на работа – Част 1“ Сборник доклади от XXII Научна конференция с международно участие ЕМФ' 2017.
- [7] Томов, Г., Б. Станков, Н. Калоянов., (2017) „Натурно изследване на термичната ефективност на отворена стена на Тромб в непрекъснат режим на работа – Част 2“ Сборник доклади от XXII Научна конференция с международно участие ЕМФ'2017.

SUMMARY

STRUCTURAL - PARAMETRIC ANALYSIS OF THE OPEN TROMBE WALL

George Delchev Tomov

Modern buildings should provide comfort for occupants, while being energy efficient and environmentally friendly. This implies a wide use of renewable energy sources. Passive solar systems meet these conditions, but each specific option requires a complex multi-parameter analysis that can be done by dynamic modellings and simulations with one of the powerful softwares - EnergyPlus, ESP-r or TRNSYS. These products are expensive and require a high level of skills. That's the reason for the creation of cheap, simple and commonly available methods for the "prediction" of the effects of using the passive solar systems.

The study is focused on the passive solar system "open wall of Trombe" in the external air supply in the premises through forced or natural ventilation for the period November-March in the climatic conditions of Bulgaria. The potential of the wall to increase energy efficiency and reduce problems known as "sick constructional symptoms" is assessed. A Simplified Model and Methodology for defining the parameters and energy characteristics of the wall were created. Natural ventilation can provide enough fresh air - no noise, no external energy. Moreover, the natural convection process is self-regulating and does not require complex automation. The wall can also be used for providing outside air in October and April, and from May to September – for removing room air or limiting incoming heat through cladding elements.

The developed model has good predictive capabilities with a high level of precision for all climatic zones of Bulgaria. The rank of significance of Tromb's open wall parameters, based on structural and parametric analysis, is valid for all temperate climates. The assessment methodology allows the facility to be designed and engineered - quickly and easily - with only available global climate data: average sunshine intensity and average air temperature over a given period. A grapho-analytical method has been created for this purpose, based on which a program has been made.

The Trombe wall reduce the cost of heating the outside air. The preliminary cost estimation of construct and montage a different configuration modules "Open Trombe wall", shows the opportunity to buy back the investment within 3 to 4 years.