



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

ЕНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ

Катедра „Хидроаеродинамика и хидравлични машини”

маг. инж. Сергей Гришин Мижорски

***„Моделиране на неизотермични въздушни
течения при възникване и разпространение на
пожар”***

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на Д И С Е Р Т А Ц И Я

За присъждане на научно-образователна степен „Доктор”

Научна специалност: 01.02.05 „Механика на флуидите”

Научен ръководител:

проф. дтн. инж. Петър Станков

Рецензенти:

проф. дтн Иван Славейков Антонов

доц. д-р Иванчо Георгиев Богоев

СОФИЯ, 2012г.

Дисертационният труд е обсъден, одобрен и насочен за защита пред Научно жури на разширен катедрен съвет на катедра „Хидроаеродинамика и хидравлични машини” при Технически Университет – София.

Редовният докторант се обучава в катедра „Хидроаеродинамика и хидравлични машини” на Енергомашиностроителен факултет при Технически Университет – София.

Изследванията по докторския труд са проведени в катедра „Хидроаеродинамика и хидравлични машини” на Енергомашиностроителен факултет при Технически Университет – София.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 22.01.2013г. от 10 часа в зала 2100А на на ТУ – София на заседание на Научното жури. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на катедра „Хидроаеродинамика и хидравлични машини” на Енергомашиностроителен факултет при Технически университет – София – 1000 София, бул. „Климент Охридски” № 8, блок 2, етаж 2.

Автор: маг. инж. Сергей Гришин Мижорски

Заглавие: Моделиране на неизотермични въздушни течения при възникване и разпространение на пожар

Тираж: 50 броя.

1. Обща характеристика на дисертацията

Актуалност на темата

Пожарите със своята природа и физика представляват основна заплаха за здравето и живота на хората. Още от древността бедствието има безпощаден ефект и въздействие върху човешката околна среда. Екстремните характеристики на пожарите много бързо и неусетно определят жизнено необходимите условия за оцеляване. В съвременния живот хората пребивават предимно в затворени или ограничени пространства като например: жилищни и обществени сгради, търговски и увеселителни центрове, метростанции и много други. Спецификата на обитаваните помещения определя до голяма степен пожарите, като от своя страна регулира горивните процеси и неизотермичните въздушни течения, генерирани по време на стихията. Не по-малко важни са и икономическите последиствия, които могат да настъпят и да окажат влияние на съвременния живот. Затварянето на тунели, нарушаването на интегритета на сгради и загубата на ценно имущество или оборудване води до големи финансови загуби. На базата на упоменатите факти изследването на пожарната безопасност се явява като основен приоритет при изграждането на всяка съвременна сграда.

Може да се обобщи, че факторите, определящи нарастващия интерес и необходимостта от детайлно разбиране на процесите на пожарите в ограничени пространства и развиващите се неизотермични въздушни течения са няколко:

- хората пребивават 90% от своя живот в затворени или ограничени пространства;
- животът и здравето на хората са силно зависими от условията в помещенията. При настъпване на пожар в ограничено пространство, жизнено необходимите условия много бързо се нарушават, затруднявайки безопасната евакуация на обитателите;
- икономическите последиствия и щетите, нанесени върху инфраструктурата и здравето на хората. Пожарите в затворени пространства могат да причинят значителни финансови и нефинансови щети.

Цел и задачи на дисертационния труд

Главната цел на дисертацията е комплексно изследване на силно неизотермични течения, резултат от разпространението на пожари в затворени и ограничени пространства. С оглед широкия обхват на проблематиката на пожарите, в частност ще бъдат разгледани жилищни

сгради. В изпълнение на поставената научноизследователска цел са определени следните задачи:

- да се анализира и оцени влиянието на климатичните условия върху развитието на пожар в ограничено пространство;
- да се разработи и приложи метод за изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в ограничено жилищно пространство, базиран на CFD *Полеви* модел;
- да се проведе експериментално изследване в апартамент за дефиниране на началните и гранични условия, необходими за целите на моделирането на пожар;
- да се създаде база данни с числени резултати на пожари в жилищни пространства;
- да се направи многопараметричен анализ на развитието на пожар в ограничено жилищно пространство, както и на неговото разпространение във вертикална посока през стъклени прегради.

Обем на дисертационния труд

Дисертационният труд съдържа 183 страници, в това число: литературно проучване, 5 основни глави, обобщени изводи и заключения, списък на основните приноси, препоръки за приложение на резултатите и списък на цитираната литература. Списъкът на използваната литература съдържа 92 заглавия, от които 3 на кирилица. Към дисертацията има и 16 страници приложения.

Апробация на дисертационния труд

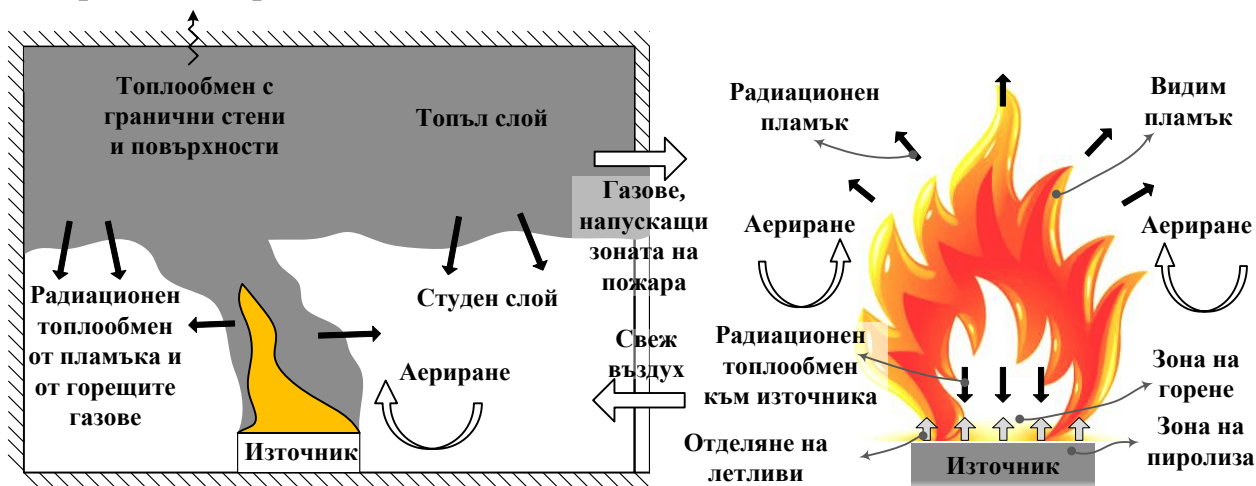
Основни резултати от дисертационния труд са публикувани на следните места:

1. XV^{-та} Научна конференция с международно участие ЕМФ'2010 – Енергия – Екология – Комфорт – Самочувствие, Созопол, 16-19 Септември.
2. III^{-ти} Международен курс – Numerical Heat Transfer, Копаоник, Сърбия, 01-06 Октомври 2011.
3. Международна научна конференция „УНИТЕХ”, Габрово, 18-19 Ноември 2011.
4. Централно Европейско Списание за Инженерство „СЕЈЕ”, Май 2012.

2. Кратко изложение на дисертационния труд

I. Съвременно състояние на проблема. Формулировка на задачата и методи за решаване

Пожарите със своята природа и физика представляват основна заплаха за здравето и живота на хората. Още от древността бедствието има безпощаден ефект и въздействие върху човешката околна среда. Екстремните характеристики на пожарите много бързо и неусетно определят жизнено необходимите условия за оцеляване. В съвременния живот хората пребивават предимно в затворени или ограничени пространства като например: жилищни и обществени сгради, търговски и увеселителни центрове, метростанции и много други. Спецификата на обитаваните помещения определя до голяма степен пожарите, като от своя страна регулира горивните процеси и неизотермичните въздушни течения, генерирани по време на стихията. Не по-малко важни са и икономическите последствия, които могат да настъпят и да окажат влияние на съвременния живот. Затварянето на тунели, нарушаването на интегритета на сгради и загубата на ценно имущество или оборудване води до големи финансови загуби. На базата на упоменатите факти изследването на пожарната безопасност се явява като основен приоритет при изграждането на всяка съвременна сграда.



Фигура 1. Примерно развитие на пожар в ограничено пространство.

Важността на пожарната безопасност в ограничени пространства като жилищни сгради, търговски обекти и офис сгради се определя също така и от статистиката на възникналите инциденти на територията на Република България през 2010 година. Според отчет-анализа за дейността на ГДПБС-МВР през 2010 година са настъпили 8141 пожара с преки материални щети, като най-голям дял представляват пожарите в жилищни сгради (40.79%). Това е още един довод за определянето на целите и проблематиката, които се разглеждат в дисертационния труд „*Моделиране*

на неизотермични въздушни течения при възникване и разпространение на пожари”.



Фигура 2. Дялово разпределение на пожарите по отрасли на територията на Република България за периода от 2005г. до 2010г.

Графиката, представена на Фигура 2, показва важността на изследването на пожарната безопасност в жилищните сгради на територията на Република България. С относителен дял от 50% ясно се определя необходимостта от детайлно разглеждане на процесите в този отрасъл.

Базирайки се на всички споменати фактори, ясно се обуславя несъмнената актуалност и необходимост на разглеждания научно-приложен проблем и го поставя между приоритетите, както на Европейския съюз, така и на Република България. Съответно предметът на дисертационния труд е насочен към численото изследване на неизотермични въздушни течения в жилищни сгради, възникнали при развитие и разпространение на пожари.

Представената информация в литературното проучване подсказва, че тематиката на дисертационния труд е широко изследвана в научните среди. Моделирането на пожари предоставя много ценна и важна информация на изследователските екипи. На базата на числените резултати са проектирани редица модерни сгради, както е оценена и пожарната безопасност в тях. В литературното проучване са разгледани серия от симулационни изследвания, базирани на CFD Полеви модели с цел определяне на основните насоки при моделиране на пожари в ограничени пространства. Оpoznavането на съвременната практика дава необходимата сигурност в проектирането на симулационните и експериментални изследвания в дисертационния труд.

На базата на литературения обзор са направени следните изводи за моделирането на пожари в ограничени и затворени пространства:

- моделирането на радиационен топлообмен е от важност за числените резултати. Игнорирането на този факт води до значително по високи температури в зоната на видимия пламък;
- апроксимирането на пожари, базирано на обемни горивни източници е достатъчно коректно и предоставя необходимата инженерна точност при моделирането. Този подход дава възможност за включване на голям брой различни горими обекти и същевременно не поставя нерешима числена задача за съвременните персонални компютри;
- представянето на вентилационните отвори е от изключителна важност за числените резултати. Правилното моделиране дава необходимата увереност за коректното развитие на пожара и съответния преход от *горивно контролиран* към *вентилационно контролиран* пожар;
- апроксимирането за общата колориметрична стойност на пожара също така представлява съществено значение за коректното представяне на пожара в числения модел;
- приложението на правоъгълна структурирана изчислителна мрежа е необходимо предусловие за успешното моделиране на пожари. Това гарантира по-малка изчислителна грешка в резултат от числените апроксимации. Също дава и по-бързо конвергиране на решението за всяка времева стъпка;
- изследването на влиянието на сгъстяването на изчислителната мрежа върху числените данни е задължително, за да може да се гарантира коректността на апроксимираните течения.

На базата на направените заключения може да се проведе задълбочено числено изследване на пожарната безопасност в ограничени пространства. Всичко това гарантира актуалността на проведените изследвания в дисертационния труд.

II. Анализ на математическия модел на софтуерния пакет FDS и SmokeView

Моделът FDS е разработен от Националния Институт за Стандартизация и Технологии (NIST), САЩ. Той се базира на уравненията за запазване на масата, химичните видове, импулса, енергията и също така на уравнението за запазване на състоянието. През 2000^{-та} година е публикуван първият софтуерен пакет FDS и SmokeView. Благодарение на постоянната работа на специалистите от NIST, днес FDS се налага като основен инженерен инструмент за анализирането на пожари в ограничени пространства. Софтуерът успешно е верифициран спрямо различни експериментални изследвания. Данните, получени от симулациите с FDS широко се прилагат в инженерната практика за пожарна безопасност. Чрез

тях изследователите могат да получат добра представа за развитието на реални пожари и инциденти.

Базирайки се на два алтернативни метода за числено моделиране, днес FDS е водещо софтуерно приложение за изследване на пожари в ограничени пространства. Като основен турбулентен модел, FDS предлага формата на Смагорински за Метода на Крупните Вихри (LES). Моделът така е проектиран, че при съгъстяване на мрежата до мащабите на Колмогоров, изчисленията преминават директно от LES към Директни Числени Симулации (DNS). В такъв случай пресмятането на течението се ограничава само до приложения с малки по обем геометрии, предимно за научни цели, верификация на нови модели и сравнителни анализи с експериментални данни.

Изчислителната задача е опростена чрез ограничаване на валидността на уравненията до нискоскоростни, конвективни потоци с акцент върху дима и топлинния транспорт при пожари. FDS решава числено уравненията на Навие-Стокс, при което частните им производни за запазване на масата, импулса и енергията са апроксимирани като крайни разлики и решението се актуализира във времето и пространството, базирайки се на триизмерна правоъгълна структурирана мрежа.

Основната явна алгоритмична схема е предиктор-коректор, а точността е от втори ред във времето и пространството. Моделът на горене се основава на едно-стъпкова, дву-стъпкова или много-стъпкова безкрайно бърза реакция. Радиационният топлообмен се определя от Модела Сив Газ (GGM) и в някои ограничени случаи, в зависимост от изчислителния капацитет, с който потребителите разполагат, може да се базира на Широко Спектърен Модел (WBM). Допълнително FDS е оптимизиран с допускането само на правоъгълна структурирана мрежа, което от своя страна значително улеснява изчислителната задача. С това си качество моделът позволява моделирането на геометрии с мрежи, достигащи до няколко милиона клетки.

На Фигура 3 е представена схема за прилагането на FDS при моделирането на пожари. Софтуерният пакет включва три неизменни компонента. Първият е Графичен Потребителски Интерфейс (GUI), който предоставя необходимата среда за инженерното приложение на модела. Разработен от трети компании, този тип софтуер е неразделна част от численото моделиране на пожари с пакета FDS и SmokeView. Задаването на геометрията, граничните и начални условия на изследваните помещения, както и дефинирането на горивните характеристики на обектите са основна част от провеждането на симулационното проучване. PyroSim като GUI към модела FDS, предлага необходимата среда за възпроизвеждане на 3D модели на сгради и помещения. Благодарение на добрия интерфейс се дава възможност за пълноценно приложение на модела с всичките му под-модели и функционалности.



Фигура 3. Диаграма за приложение на пакета FDS и SmokeView в инженерната практика.

FDS представлява изчислителен модул (*Солвър*), на който се стартират сорс кодовете, разработени с PyroSim. Без GUI, предлагащ визуална среда за работа с модела, значително би се затруднило симулационното изследване на пожарите с предложения CFD *Полеви* модел.

SmokeView е съпътстваща програма към FDS, която възпроизвежда изображения и анимации на резултатите. Този модул за графична обработка дава възможност за визуализация на числените данни. SmokeView с триизмерната си графика е неразделна част от модела, тъй като позволява по този начин да се оценят различните характеристики на пожари в ограничени пространства, които обикновените визуализиращи софтуерни продукти не предлагат.

Благодарение на оптимизирания *Солвър* и широката верификация на числените резултати, пакетът FDS и SmokeView се явяват отличен инструмент за продължително и детайлно моделиране на неизотермични въздушни течения при възникване и разпространение на пожари в сгради и помещения. Също така възможността за стартиране на паралелни изчислителни процеси значително увеличава приложимостта на модела и възможностите за изследване на разпространението на дим в многоетажни жилищни, офисни и търговски обекти.

Въз основа на направения анализ на модела FDS може да се формират следните изводи и заключения:

- изборът на FDS като специализиран софтуер, базиран Изчислителна Механика на Флуидите (CFD), предоставя удобна и ефективна среда за пълноценно и продължително изследване на пожари в ограничени пространства;
- моделирането на неизотермични въздушни течения при разпространението на пожари трябва да е базирано на следния CFD *Полеви* модел:

- LES метод за числено симулиране – турбулентен модел на Смагорински;
- модел на горене – едно-стъпков с непълно изгаряне безкрайно бърза реакция;
- модел за радиационен топлообмен – Сив Газ.
- поради структурираната правоъгълна мрежа, определена за база на FDS, трябва да се обърне допълнително внимание при генерирането на изчислителната среда. При преизчисляването е възможно обектите, които не съвпадат с позиционната решетка да бъдат апроксимирани неподходящо. Това може да доведе до загуба на прецизност и точност на резултатите;
- преди стартирането на всяка симулация трябва да се оптимизира наборът от изходни данни. Веднъж стартирана изчислителната процедура, не могат да се редактират или променят зададените параметри на симулацията.

Разгледаният в тази глава модел на FDS, дава много добра база за моделиране на неизотермични въздушни течения при развитието и разпространението на пожари в жилищни пространства.

III. Анализ и оценка на влиянието на климатичните условия върху развитието на пожар в ограничено пространство

Основната цел на численото изследване е оценката и анализът на влиянието на климатичните условия върху пожар. Също така необходимо е да се верифицират получените данни с експериментални, които са избрани от литературни източници. Важна част от текущата глава е и създаването на процедура за оценка на влиянието на различните параметри на климатичните условия върху развитието на пожари в ограничени пространства. От друга страна от голямо значение е определянето на основните насоки за разработването на метод за изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в жилищно пространство.

Изследването се основава на числена оценка на влиянието на климатичните условия върху развитието на пожара в жилищно помещение. Основно внимание е отделено на скоростния профил на вятъра, атмосферната температура, налягането и влажността на въздуха. На базата на серия от CFD симулации е оценено влиянието на всеки параметър. Всички числени резултати са анализирани и сравнени със средната температура на газовата фаза, измерена по време на експеримента в Далмарнок, Глазгоу, Шотландия. Това дава необходимата увереност при определянето на основните насоки за разработването на процедурата за оценка на влиянието на различните параметри на климатичните условия,

които оказват въздействие върху развитието на пожари в ограничени пространства.

Геометрията на помещението и на горивните източници в числените модели се базира на експеримента, проведен с неконтролирани вентилационни условия в Далмарнок, Глазгоу, Шотландия. Всички числени резултати са сравнени с експериментални данни за средната температура на газовата фаза в Тестовото Помещение (ТС), илюстрирано на Фигура 4.

Всички гранични условия, източници на огън и геометрията на помещението са апроксимирани спрямо реалните параметри на експеримента. Процесът на численото изследване се разделя на три последователни части:

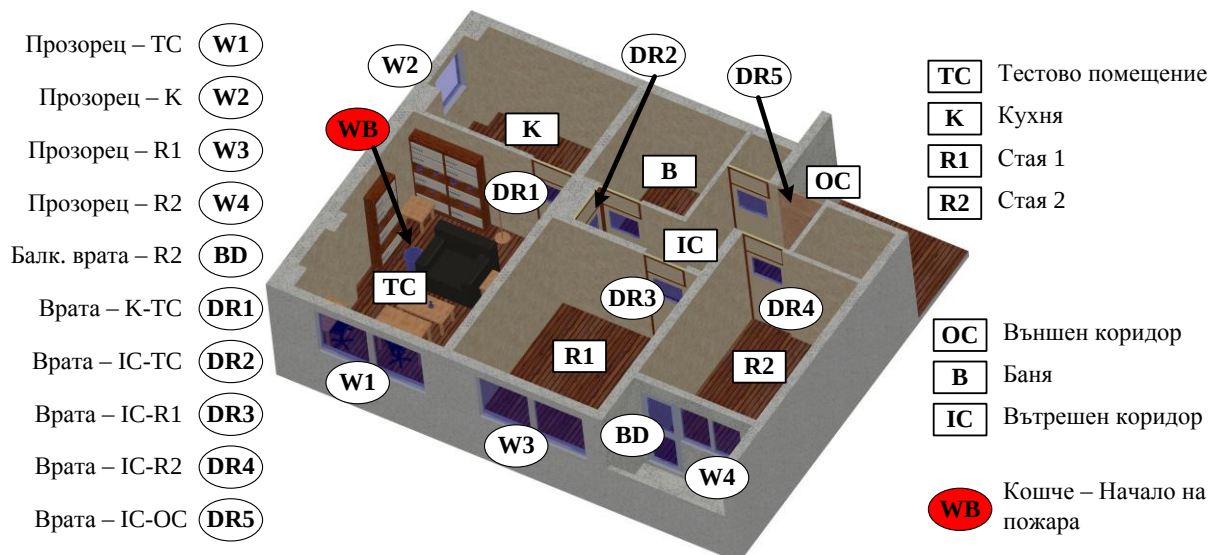
- провеждане на Изследване за Решение, Независещо от Изчислителната Мрежа (GIS);
- изследване влиянието на климатичните условия върху числените резултати на базата на предварително дефинирани стойности за скоростта на топлоотделен $\dot{Q}$;
- числено Решение, Независещо от Изчислителната Мрежата (GISol).

Горивните източници са моделирани спрямо две алтернативни времеви функции за скоростта на топлоотделяне:

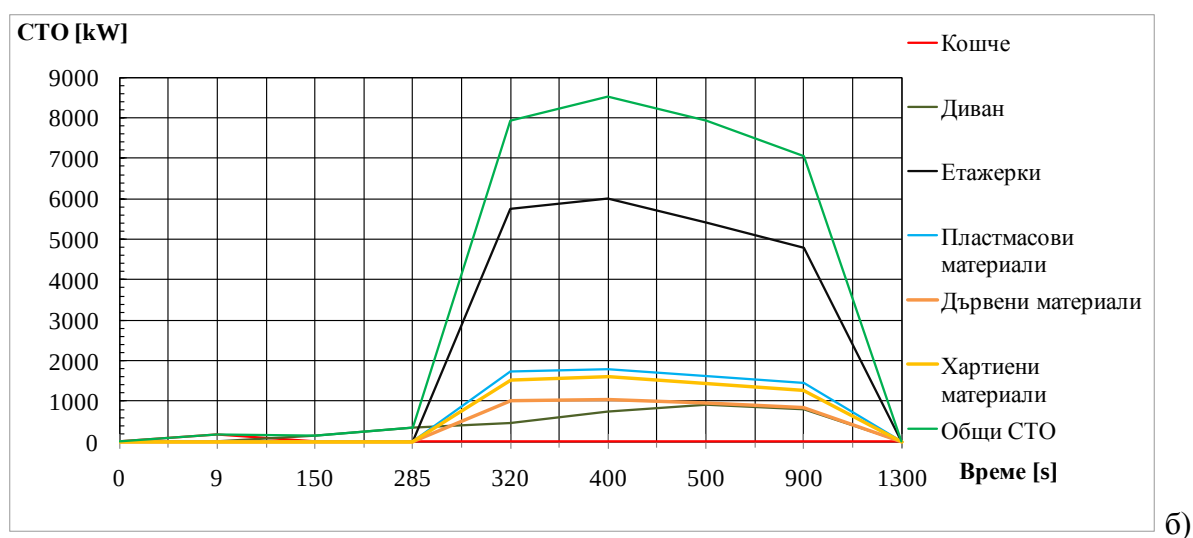
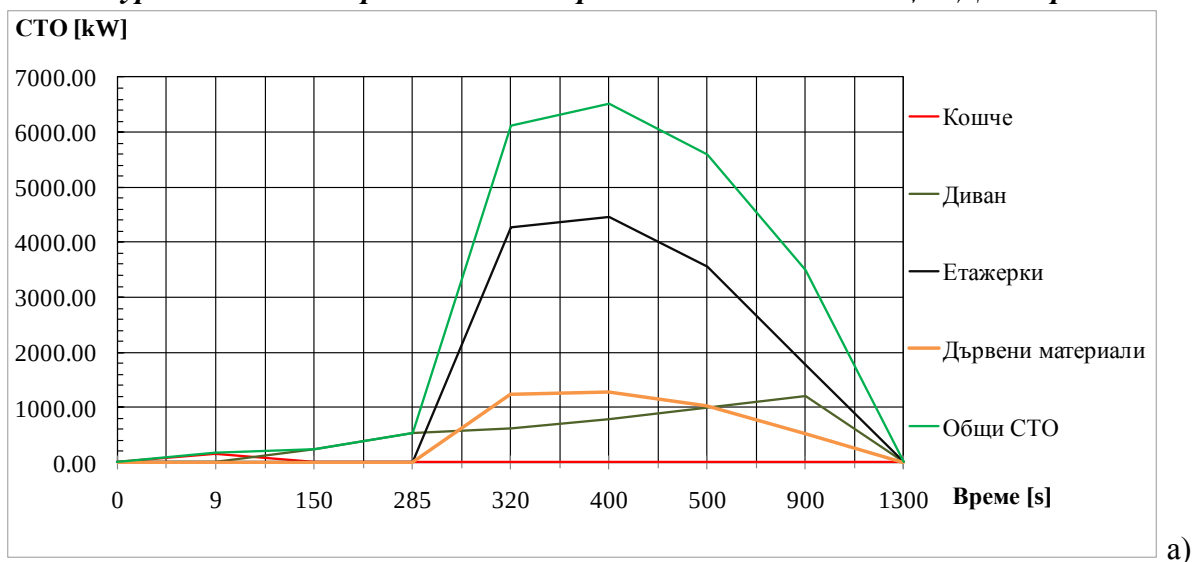
- първата, определена от числените изследвания, (Фигура 5а);
- втората, дефинирана спрямо материалните характеристики на обектите, (Фигура 5б).

Като заключение от направените изследвания, базирани изчислителната геометрия представена на Фигура 6 могат да се извлекат следните изводи:

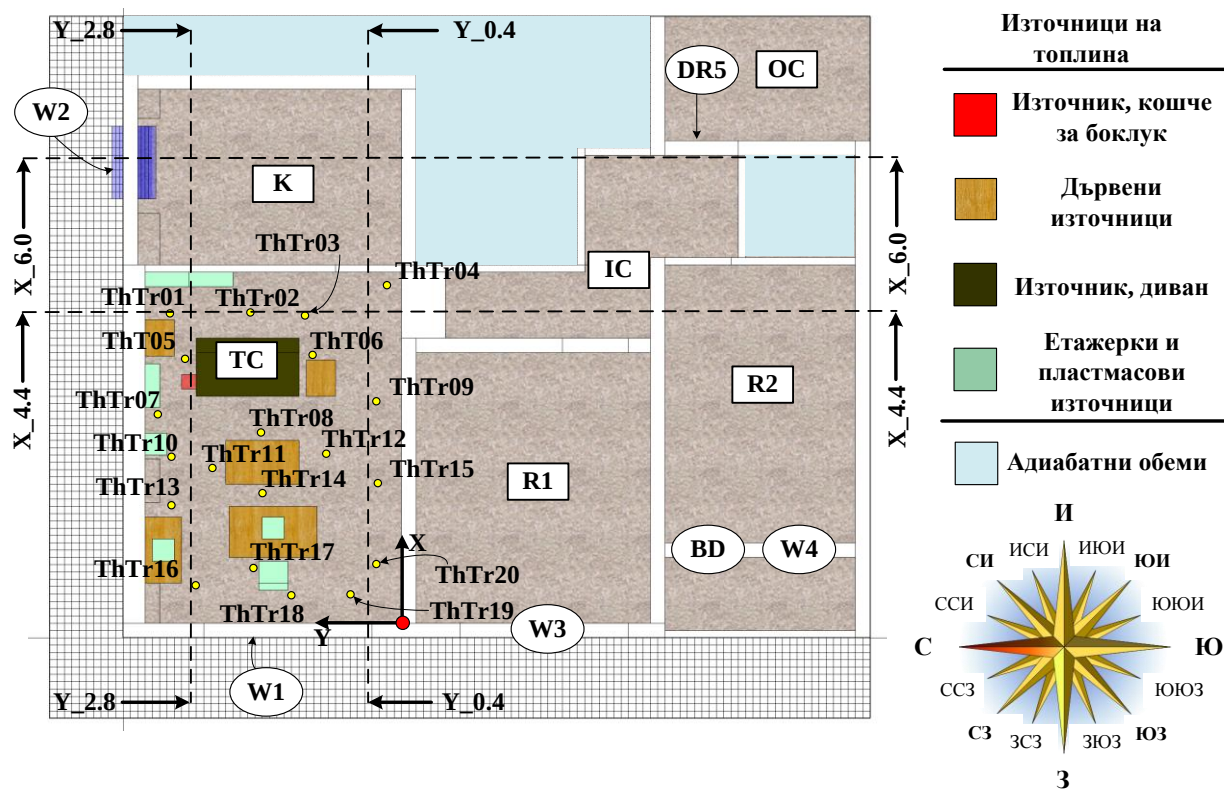
- основно влияние върху числените резултати оказва външната атмосферна температура T_a . С намаляване стойността на T_a се осъществява значително по-добро аериране на помещението и на огъня (Фигура 7а);
- скоростният профил на вятъра, дефиниран от V_a и WD , оказва силно влияние на притока на свеж въздух в зоната на огъня. Особено внимание трябва да се обърне на компонента на профила на вятъра по нормалата, насочена към отворите на помещението, които са основен източник на свеж въздух (Фигура 7б и 7в);
- степента на влияние на атмосферното налягане P_a с оглед на изследваните вариации е значително по-малка в сравнение с тази на атмосферната температура T_a или на скоростния профил на вятъра (Фигура 7г);
- при дадения модел влиянието на влажността на въздуха RH е пренебрежително малко;



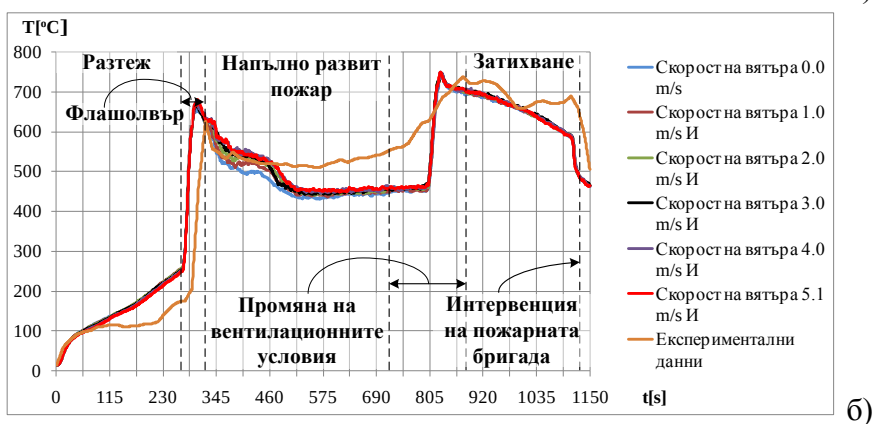
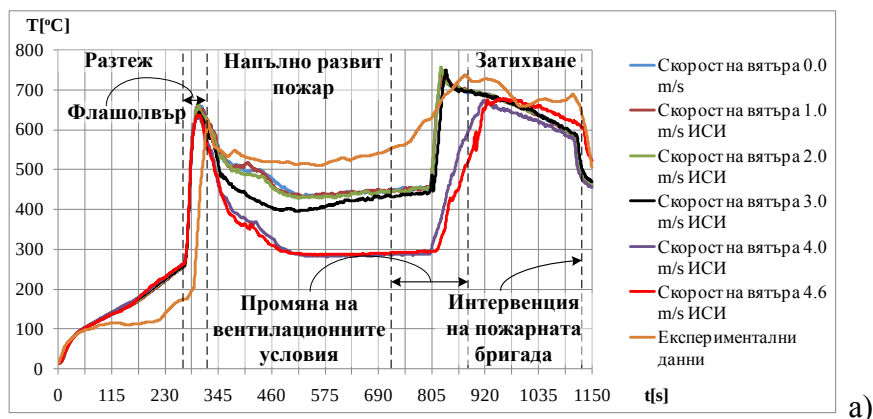
Фигура III.4. Геометрията на експерименталното жилище в Далмарнок.

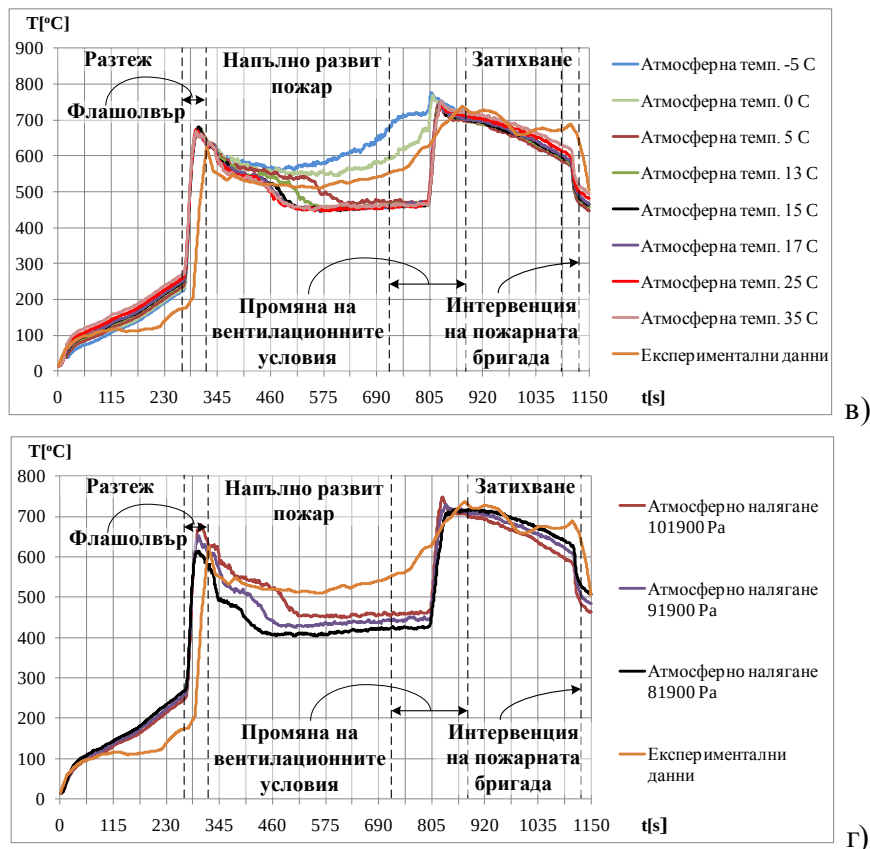


Фигура 5. Графики на СТО за различните групи горивни източници за: а) GIS и изследване влиянието на атмосферните условия, б) GISol.

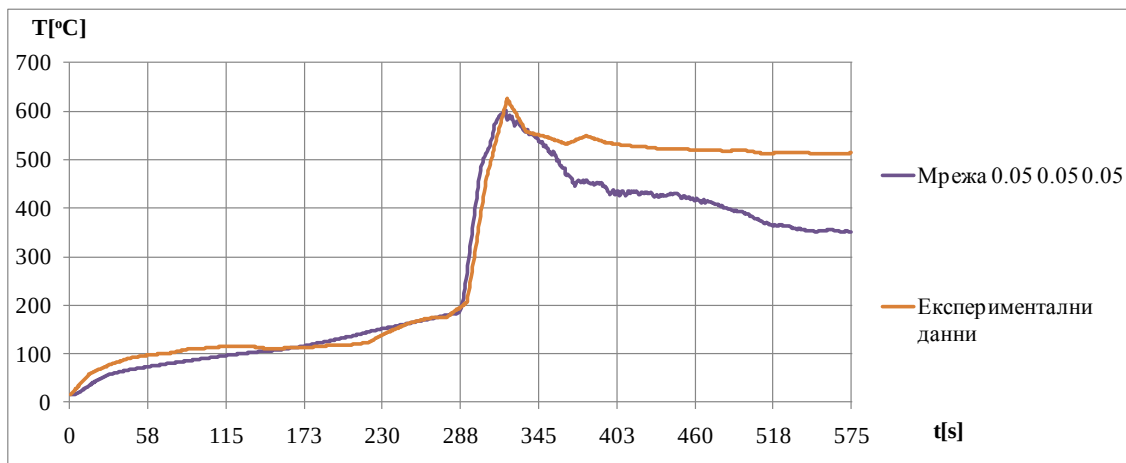


Фигура 6. Изчислителна мрежа, горивни източници и уредби с термодвойки.





Фигура 7. Средни температури на горещите газове от числените симулации сравнени с експерименталните данни в Далмарнок при: а) различни стойности на T_a ; б) $WD = \text{Изток} - \text{Север} - \text{Изток}$ и различни стойности на скоростта V_a ; в) $WD = \text{Изток}$ и различни стойности на V_a ; г) различни стойности на P_a .



Фигура 8. Средни температури на горещите газове от симулацията с размери на клетките $\Delta x_c = 0.05$ [m], $\Delta y_c = 0.05$ [m] и $\Delta z_c = 0.05$ [m] и данни от експеримента в Далмарнок

- моделирането на неизотермичните течения е силно повлияно от резолюцията на съответната изчислителна среда. По-фината мрежа подчертава ефекта от циркуляционните зони, които се образуват при бурните процеси на *флашолвър*. Това силно определя аерирането в зоната на огъня;

- апроксимирането на горивните обекти на базата на определените времеви функции $f(t)$, представени на Фигура 5б дава добро приближение до реалното развитие на пожара в ограниченото пространство, както може да се види на илюстрираната диаграма на Фигура 8.

На базата на заключенията могат да се определят основните параметри, необходими за определянето на коректни гранични условия, които ще дадат необходимата увереност в числените резултати. Именно това са атмосферната температура, температурата на съседните помещения, налягането и скоростния профил на вятъра. Също така от изключителна важност е и определянето на влиянието на изчислителната мрежа върху числените резултати.

Основните насоки за създаването на метод за изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в жилищно пространство са следните:

- от изключителна важност е изборът на софтуерно приложение за изследване на пожари. Препоръчителни са специализираните CFD апликации, предлагащи инженерен подход при моделирането;
- ясното дефиниране на параметрите на помещението: геометрия, горими обекти, начални и гранични условия е необходимо предусловие за успешното извършване на изследването;
- изборът на материалните характеристики трябва да се уповава на литературни източници: стандарти, експерименти и доклади от проведени изследвания;
- без провеждането на GIS е невъзможно гарантирането на математически коректни резултати;
- определянето на развитието на пожара трябва да се осланя на емпирични наблюдения и зависимости;
- коректната оценка на разпространението на пожари в ограничени жилищни пространства трябва да се осланя на емпирични наблюдения и зависимости.

Изложените заключения и насоки дават добра основа за продължение на работата в дисертационния труд - създаване на метод за изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в жилищни пространства, базиран на CFD *Полеви* модел.

IV. Метод за изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в жилищно пространство

Основната цел в тази част на дисертационния труд е разработването на метод за изследване на разпространение през стъклените прегради на

пожар в жилищно пространство, базиран на CFD *Полеви* модел. Предложените процедури трябва да се основават на литературния обзор в *Глава I*, както и на заключенията и насоките, предоставени в *Глава III*.

Разработеният метод дава необходимата последователност от процедури за коректното анализиране на развитието и разпространението на пожар в ограничено пространство. Въпросната хронология от действия е определена на базата на проведения литературен обзор и на предоставените насоки при оценката и анализа на влиянието на климатичните условия върху пожар в жилищно помещение. Различните стъпки на метода включват няколко основни елемента, а именно:

- софтуерни приложения;
- помещение, което представлява интерес за изследването;
- начални и гранични условия;
- горими обекти;
- виртуална геометрия и изчислителна мрежа;
- математически модел (CFD *Полеви* модел, алгоритми за апроксимация на числените резултати);
- емпирични зависимости за устойчивостта на стъклените прегради;
- база данни с числени резултати.

На основата на всички тези елементи може да се проведе изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в жилищно пространство, базирано на CFD *Полеви* модел.

Може да се направи заключение, че създаденият метод регулира моделирането на пожари в ограничени пространства с цел оценка на разпространението на стихията през стъклените прегради. Така представена, хронологията на численото изследване дава възможност за допълнителни модификации и уникалност на симулационния анализ на всеки конкретен обект. Цялостната хронологична схема е съставена от осем последователни стъпки:

- Стъпка 1: Дефиниране на задачата – Определяне на софтуерни пакети и физически модел;
- Стъпка 2: Физически модел – Определен на параметрите, дефиниращи началните и гранични условия;
- Стъпка 3: CFD *Полеви* – Определяне на под-модели;
- Стъпка 4: GIS – Изследване за Решение, Независещо от Изчислителната Мрежа;
- Стъпка 5: Анализ на развитието на пожара;
- Стъпка 6: Анализ на разпространението на пожара;
- Стъпка 7: GISol – Решение, Независещо от Изчислителната Мрежа;
- Стъпка 8: Заключение и препоръки;

V. Приложение на метода за изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в жилищно пространство

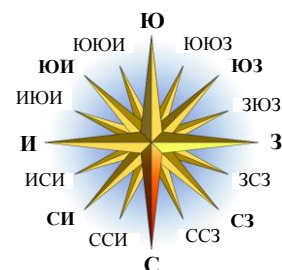
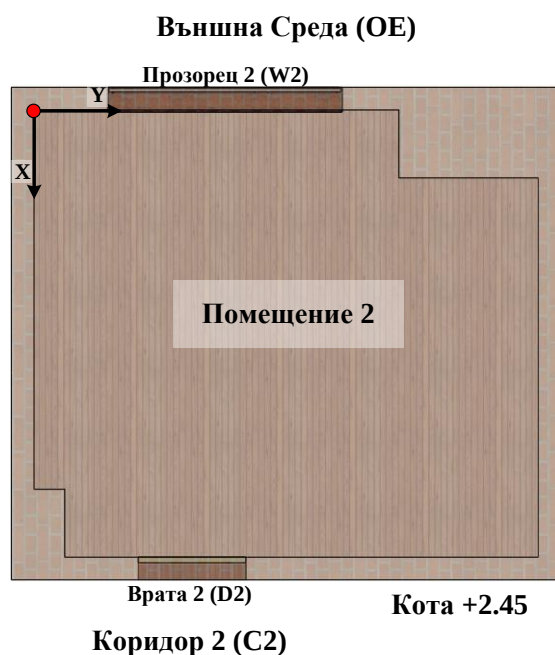
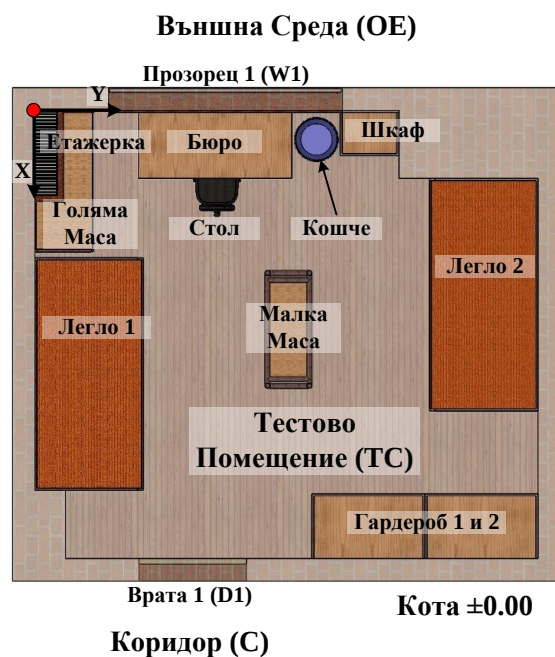
Целта на тази част от дисертационния труд е приложението на метода за изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в жилищно пространство. Като най-основни задачи се открояват изследването за определянето на параметрите, дефиниращи началните и гранични условия на CFD *Полеви* модел на реално жилищно помещение, намиращо се в град София, България, както и определянето на основните групи горивни източници. На базата на обработените данни трябва да се проведе подробно числено проучване на пожар в определеното жилищно пространство по *Стъпки 4, 5, 6 и 7* от метода.

Изследването е организирано спрямо указания, предоставени в *Глава IV* от дисертационния труд. В *Стъпка 1* са определени всички софтуерни приложения, предвидени за използване в проучването, както и конкретният физически модел, който е цел на изследването. В *Стъпка 2* е проведен експеримент за измерване на параметрите, дефиниращи началните и гранични условия.

Преди стартирането на симулациите, трябва да се избере CFD *Полеви* модел, необходим за целите на проучването. Това е извършено в *Стъпка 3* от метода. От друга страна, в *Стъпка 4* стартира самото числено изследване, където е проведен задълбочен анализ на влиянието на изчислителната мрежа. Важно е да се спомене, че в процеса са включени общо шестнадесет симулации с вариация на резолюцията от 0.2 [m] до 0.04 [m]. Също така са предложени и четири варианта на термично натоварване, което от своя страна разширява обхвата на направените заключения в GIS.

В *Стъпка 5* от метода се анализира развитието на пожара при шестнадесет различни комбинации на статично позициониране на вентилацията (вратата и прозореца) на Тестовото Помещение, което е илюстрирано на Фигура 9. Това предоставя необходимата оценка за развитието на пожара. Осланяйки се на емпиричните зависимости, са определени критичните стойности за издръжливост на стъклените прегради за двоен стъклопакет. Такъв е и случаят на изследваното помещение. На базата на данните са определени следните два параметъра:

- критична стойност на температурата на газовата фаза, намираща се в непосредствена близост до прозорец, определена за разпад на двоен стъклопакет при пожар в ограничено пространство, $T_{\text{wind.gases}} = 600$ [°C];
- критична стойност на топлинния поток, намиращ се в непосредствена близост до прозорец, определена за разпад на двоен стъклопакет при външен пламък, $\dot{q}_{\text{critical}} = 50$ [kW/m²].



Фигура 9. Геометрия на Тестовото Помещение, Помещение 2 и горимите обекти.

С фиксирането на тези параметри става възможно численото изследване на процеса на разпад на прозорците, както и на съответното разпространение на пожара във вертикална посока към горната кота на сградата, т.е. от Тестовото Помещение към Помещение 2, илюстрирани на Фигура 9. Определянето на средната газова температура, намираща се в непосредствена близост до стъклените прегради на ТС, както и на съответния топлинен поток от външната страна на стъклата на Помещение 2, дава просто приближение на сложните процеси, протичащи по време на пожара. По този начин на базата на проведените симулации числено са дефинирани времевите точки на разбиване на стъклените прегради, което

от своя страна възпроизвежда приблизителното реално развитие на пожара в жилищното пространство.

На основата на експерименталните данни от *Стъпка 2* са определени калориметричните стойности на различните групи горивни източници в жилищното помещение. Предложеното развитие на пожара, както и съответните времеви функции $f(t)$ са използвани в анализите на *Стъпки 5, 6 и 7*.

В *Стъпка 6* на базата на експерименталните данни от *Стъпка 2* са моделирани осем различни начални и гранични условия при пет селектирани режима на вентилиране на помещението. Оценено е развитието на пожара, като е дефинирано разпадането на стъклените прегради на ТС. Спрямо резултатите от *Стъпка 6* са селектирани режимите за моделирането с резолюцията, определена в GIS. Симулациите са проведени в *Стъпка 7*. В *Стъпка 8* са описани всички заключения и зависимости, представляващи интерес за изследването.

Експерименталното измерване е проведено от 16:04 09.02.2012г. до 10:32 13.02.2012г. По време на проучването са записани следните параметри, определящи физическия модел на Тестовото Помещение (ТС), Коридора, Помещение 2 и Външната Среда на сградата:

- температурните стойности за всички области без Помещение 2;
- влажността на въздуха за всички области без Помещение 2;
- атмосферното налягане.

Също така са определени и следните параметри, които са от значение за численото изследване:

- размерите на помещенията и вентилационните отвори, представляващи интерес за изследването;
- размерите и масата на горимите обекти в Тестовото Помещение;
- размерите на Помещение 2.

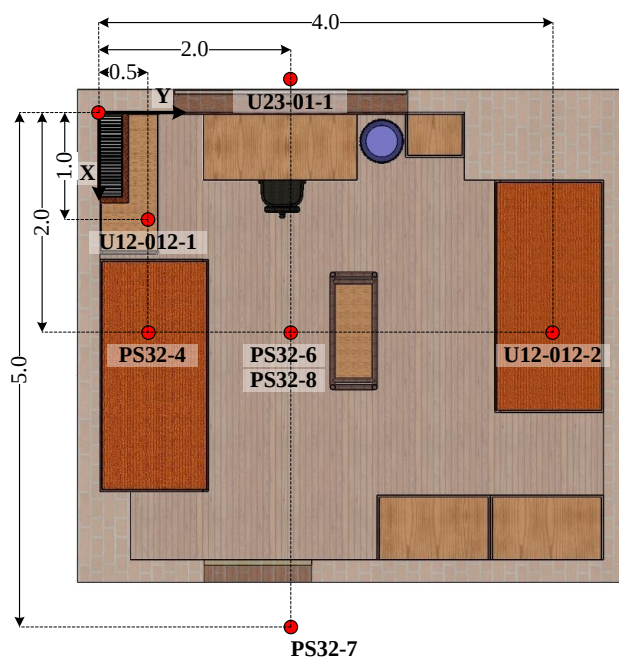
Определянето на температурата, влажността и налягането се базира на измерванията, направени със седем измервателни уреда. Скоростният профил на вятъра е взиман от любителска метеорологична станция, разположена в близост до локацията на експерименталното помещение в кв. Мусагеница, град София.

Измерването на количеството материали в ТС е съпроводено със съответното групиране на обектите в осем типа обемни горивни източника. Това се налага именно поради ограничените възможности за апроксимация в математическия модел. Калориметричната стойност на пожара е дефинирана спрямо енергията на горене на материалите, от които са изградени горимите обекти, както и спрямо тяхното тегло. Измервайки масата и оценявайки процентното съдържание на всеки материал в източниците, възможно е тяхното апроксимиране в CFD *Полевия* модел на FDS.

По време на експеримента за определяне на климатичните условия са използвани три типа измервателни уреда. Разположението на уредите в ТС е илюстрирано на Фигура 10, където може да се види схема със съответните позиции на всеки уред. В Таблица 1 са показани техните технически характеристики.

Таблица 1. Технически характеристики на измервателните уреди.

№	Наименование на сензора	Измервани параметри	Обхват и точност	Количество	Обозн.
1.	Indoor Air Quality Monitor PS32	Температура	от +10 до + 45 [°C] ±0.1 [°C]	4 броя	PS32-4 PS32-6 PS32-7 PS32-8
		Относителна влажност	от 0 до 100 [%] ±0.1 [%]		
		Атмосферно Налягане	от 900 ÷ до 1100 [hPa] ±1 [hPa]		
2.	HOBO data logger U12-012 Temp/RH/Light/Ext	Температура	от - 20 до + 70 [°C] ± 0.35 [°C]	2 броя	U12-012-1 U12-012-2
		Относителна влажност	от 5 до 95 [%] ±2.5[%]		
3.	HOBO data logger U23-01 Pro v2 Temp/RH outdoor	Температура	от - 40 до + 70 [°C] ± 0.2 [°C]	1 брой	U23-01-1



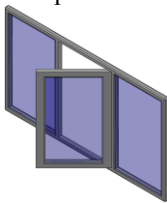
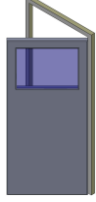
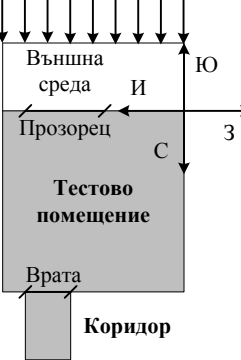
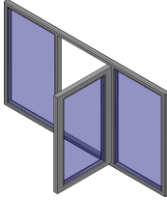
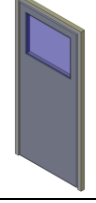
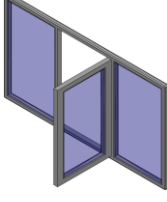
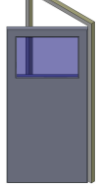
Фигура 10. Разположение на измервателните уреди.

На базата на измерените стойности за различните параметри, определящи началните и гранични условия за числените модели, може да се проведе обстойно симулационно изследване на възможен пожар в Тестовото Помещение. Също така може да се спомене, че важна част от проучването е и определянето на калориметричната стойност на горимите

обектите и тяхното групиране с цел по-лесна апроксимация в математическия модел на помещението. Всичко това дава много добра база за провеждането на числено изследване на пожар в ограничено пространство и оценка на възможностите за вертикално разпространение на стихията през отворите на прозорците.

В приложението на метода са изпълнени общо 77 симулации на пожар в избраното жилищно пространство. Най-голям риск от вертикално разпространение на пожара през стъклените прегради на Тестовото Помещение към Помещение 2 представлява Режим 3.5 със следните характеристики, представени в Таблица 2.

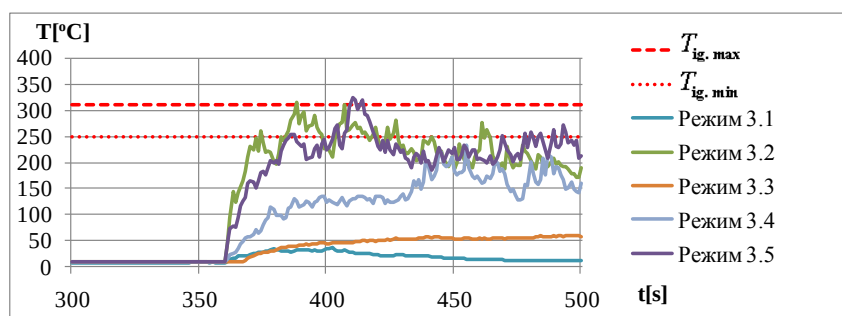
Таблица 2. Режим с най-голяма опасност от разпространение на пожара.

Режим	Режим на вентилиране		Режим на климатичните условия		
№	№	Схема – Прозорец 1	Схема – Врата 1	№	Схема
3.2	1.11	Режим на отваряне – 45° 	Режим на отваряне – 45° 	2.8	 $V_a=2 \text{ [m/s]}$ $WD=IO$ $T_r=21.06 \text{ [}^\circ\text{C]}$ $T_a=-3.59 \text{ [}^\circ\text{C]}$ $T_c=15.04 \text{ [}^\circ\text{C]}$ $P_a=929.3 \text{ [hPa]}$ $RH=73.32 \text{ [%]}$
3.4	1.13	Режим на отваряне – 90° 	Режим на затворена врата 		
3.5	1.15	Режим на отваряне – 90° 	Режим на отваряне – 45° 		

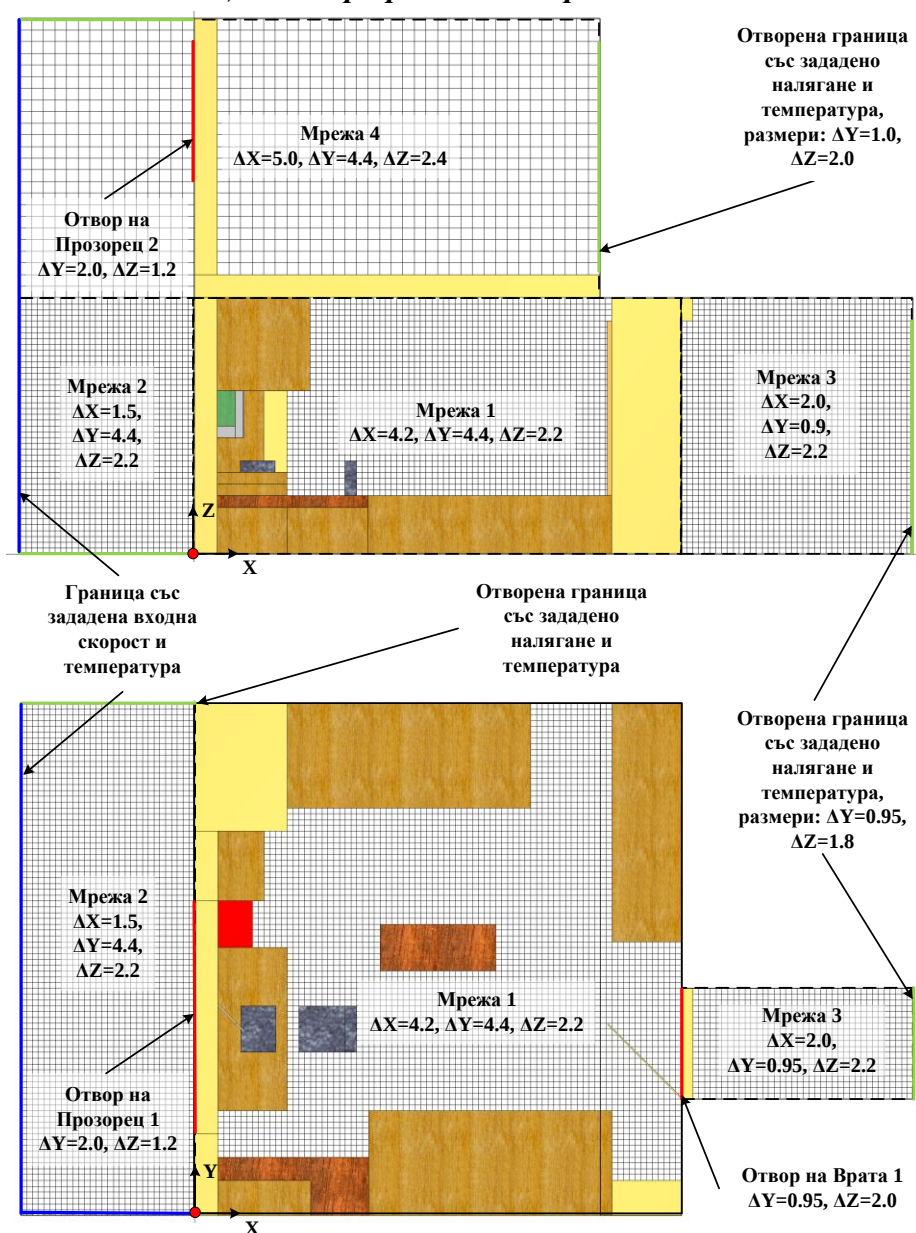
За целта на изследването е предложен диапазон на критичната температура на самозапалване за дърво:

- критична температура на самозапалване за дърво – долна граница:
 $T_{ig, \min} = 250 \text{ [}^\circ\text{C]}$;
- критична температура на самозапалване за дърво – горна граница:
 $T_{ig, \max} = 310 \text{ [}^\circ\text{C]}$.

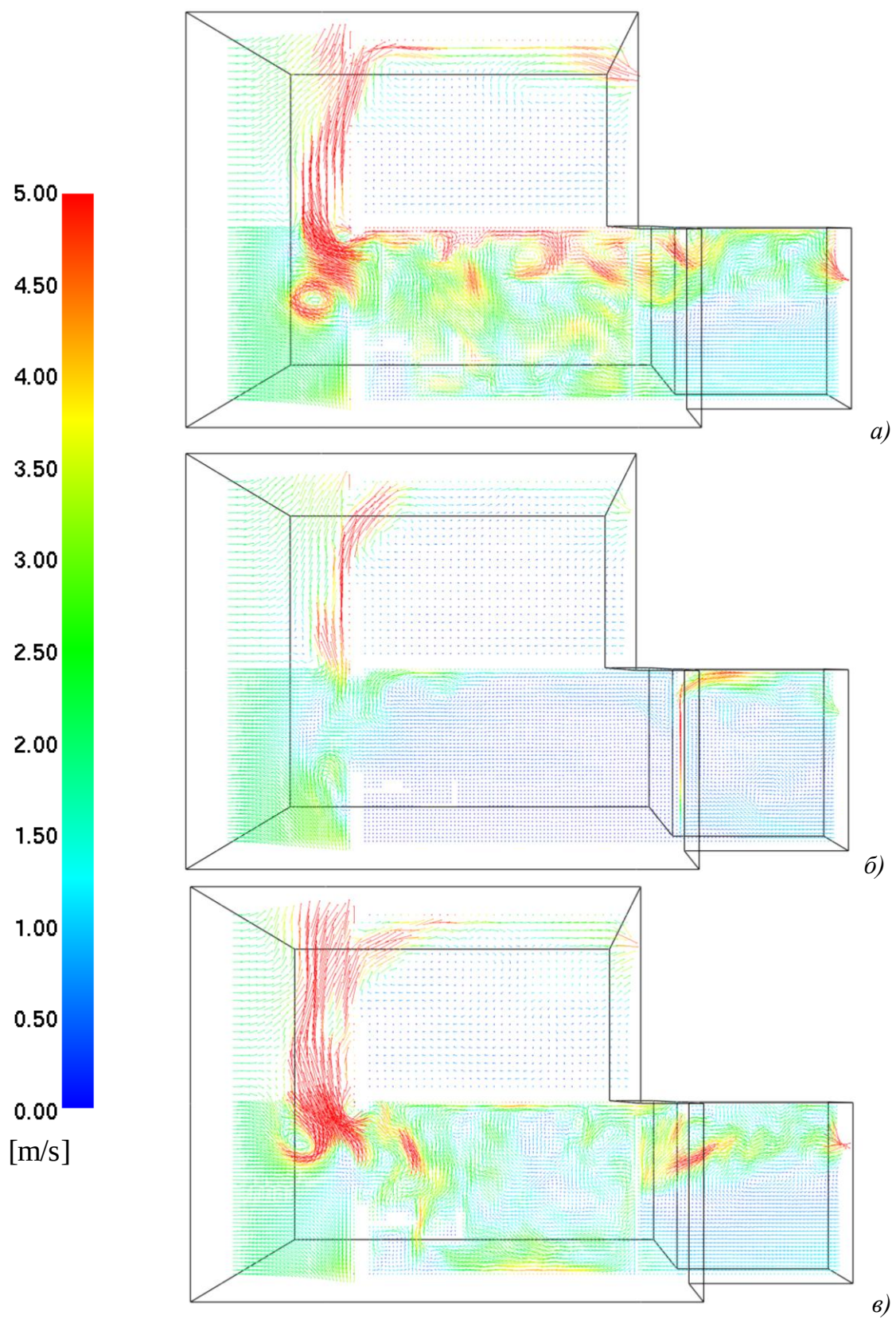
В $t_{\text{instant}} = 410^{\text{та}}$ секунда температурата на газовата фаза в контролния обем, определен в горния еднометров слой на помещението, преминава критичната стойност $T_{\text{ig, max}} = 310[^\circ\text{C}]$ (Фигура 11 – Режим 3.5).



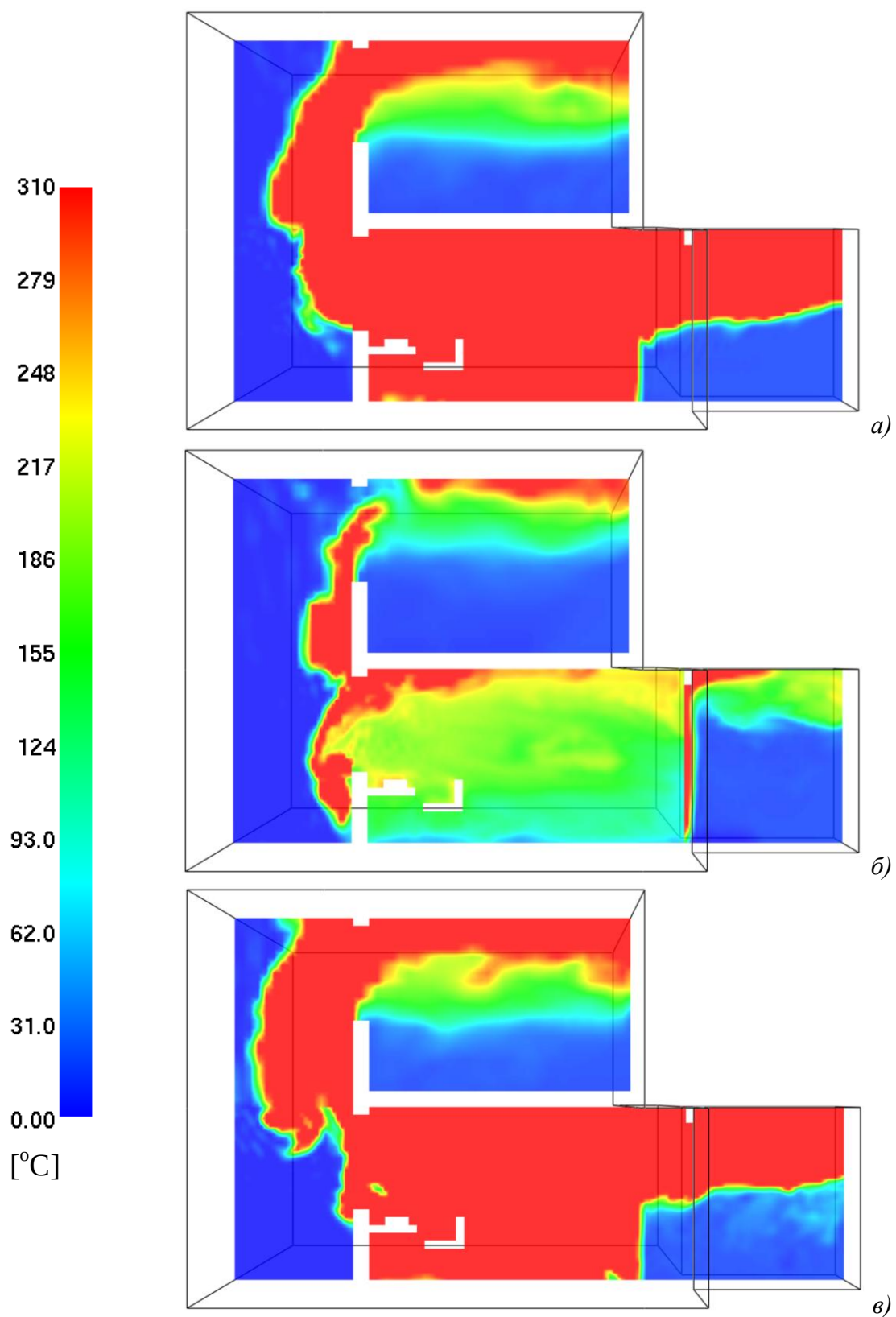
Фигура 11. Средна температура на газовата фаза в горния еднометров слой в Помещение 2 при различните режими в GISol.



Фигура 12. Изчислителна среда при GISol.



Фигура 13. Скоростни полета в GISol, $Y=1.8$ [m], $t_{\text{instant}} = 440^{\text{ma}}$ секунда, Режим: а) 3.2; б) 3.4; в) 3.5.



Фигура 14. Температурни полета в GISol, $t_{\text{instant}} = 440^{\text{ma}}$ секунда, $Y=1.8$ [m], Режим:
 а) 3.2, $t_{\text{instant}} = 390^{\text{ma}}$ секунда; б) 3.4, $t_{\text{instant}} = 440^{\text{ma}}$ секунда; в) 3.5, $t_{\text{instant}} = 410^{\text{ma}}$ секунда.

Изчислителната мрежа на числените модели при Режими от 3.1 до 3.5 е представена на Фигура 12. Приложена е решетка с размери $\Delta x_c = 0.05 [m]$, $\Delta y_c = 0.05 [m]$ и $\Delta z_c = 0.05 [m]$. Общият брой клетки в изчислителната среда е 527648.

От друга страна, скоростните полета в $440^{-та}$ секунда за Режими 3.2, 3.4 и 3.5 са показани на Фигура 13. Илюстрираните полета точно представят неизотермичните течения, образувани по време на пожара. Сечението, през което са извлечени скоростните вектори е $Y=1.8 [m]$, което от своя страна минава през средата на Прозорец 1 в Тестовото Помещение, както и съответно през средата на Прозорец 2 в Помещение 2. Ефектът от скоростния профил на вятъра е ясен. След разбиването на стъклата на Прозорец 2, вятърът тласка неизотермичното течение, образувано от пожара, плътно по стената на сградата, което дава много добри предпоставки за навлизане на продуктите на горене в Помещение 2. Образуват се циркуляционни течения, което от своя страна допълнително допринася за благоприятните условия за разпространение на пожара. В Режими 3.2, 3.4 и 3.5 вероятността за разпалване на обектите е критична. Освен това се наблюдават и значителни количества дим в Помещение 2, което силно може да навреди на здравето на обитателите.

С Фигура 14 са представени най-опасните моменти за разпространението на пожара при Режими 3.2, 3.4 и 3.5. Ясно се подчертава големият риск от разпалване на мебелите и обектите, разположени в Помещение 2. От трите режима най-критичен може да бъде определен 3.5, тъй като при него нивото на температурата T минава над $T_{ig. max} = 310 [^{\circ}C]$ в $t_{instant} = 410^{-та}$ секунда.

С предложеното приложение на метода за изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в жилищно пространство, базирано на CFD *Полеви* модел, се доказва значителното преимущество на числените проучвания пред експерименталните. Прилагането на CFD за анализиране на пожари в ограничени пространства е незаменима алтернатива на реалните пожарни тестове. Независимо от това, все още остава въпросът за моделирането на горивните източници, за необходимостта от определянето на калориметричните стойности на обектите, както и на развитието на стихията. Без коректни времеви функции, задаващи отделянето на летливите, възможно е значително отклонение на числените резултати от реалността.

3. Изводи от дисертационния труд

Изследването на пожарната безопасност е от изключителна важност за здравето и живота на обитателите в ограничените пространства. Екстремните характеристики на стихията много бързо и неусетно определят жизнено необходимите условия за оцеляване. На територията на Република България, с относителен дял от 50% за периода от 2005г. до 2010г., ясно се открояват пожарите в жилищните сгради. Затова с спецификата си те се явяват като най-важен отрасъл при оценката на пожарната безопасност.

Изследванията, базирани на компютърни апроксимации са най-подходящият метод за оценка на пожари, предлагайки евтин и бърз начин за анализиране на развитието и разпространението на стихията. С широкото разпространение на специализирани приложения, предлагащи CFD *Полеви* модели за моделиране на процесите в ограничени пространства се дава значителна свобода при анализа. Пакетът FDS, като CFD софтуер е изключително подходящ за анализ на пожари в жилищни сгради, тъй като предлага добър интерфейс, оптимизиран *Солвър*, голям набор от инструменти за моделиране на процесите, както и за възпроизвеждане на експериментални изследвания. По този начин проучванията значително се улесняват. С много добра последваща обработка на данните и визуализация, могат лесно и бързо да се представят резултатите в подходящ вид.

В изследването ясно е доказано влиянието на изчислителната мрежа върху апроксимираните резултати. При анализа на пожари в ограничени жилищни пространства решението, независимо от мрежата, е установено при 0.05 [m] дължина на клетката при структурирана правоъгълна решетка. Това също така е валидно за съответното помещение, както и при различни термални натоварвания. Със сгъстяването на изчислителната мрежа се наблюдава намаляване на средно обемната стойност на температурата на газовата фаза. Може да се види, че скоростта на намаляване на видимостта или прозрачността на средата е по-висока при разреждане на мрежата. По-фината решетка подчертава ефекта от циркулационните зони, които се образуват при бурните процеси на пълното обхващане на помещението от пожар. Това силно определя аерирането в зоната на огъня, поради структурата на ограничените пространства.

Става ясно, че с направения сравнителен анализ на числените резултати и на експеримента в Далмарнок, Шотландия, са установени следните заключения и зависимости:

- основно влияние върху развитието на пожара оказва външната атмосферна температура T_a . С намаляване стойността на T_a се осъществява значително по-добро аериране на помещението и на огъня;

- скоростният профил на вятъра, дефиниран от V_a и WD , оказва силно влияние на притока на свеж въздух в зоната на огъня. Особено внимание трябва да се обърне на компонента на профила на вятъра по нормалата, насочена към отворите на помещението, които са основен източник на свеж въздух;
- степента на влияние на атмосферното налягане P_a , с оглед на изследваните вариации, е значително по-малка в сравнение с тази на атмосферната температура T_a или на скоростния профил на вятъра;
- влиянието на влажността на въздуха RH е пренебрежително малко в CFD *Полевия* модел FDS;
- апроксимирането на горивните обекти на базата на определените времеви функции $f(t)$ (Фигура 5) дава добро приближение до реалното развитие на пожар в ограничено жилищно пространство.

Времевата графика за представяне на горивните обекти, определена при експерименталното изследване в Далмарнок, както и допълнителната ѝ модификация, представена в дисертационния труд, може да бъде възприета за проучване на пожари в ограничени жилищни пространства. Сходството при геометрията на тестовото помещение и възможностите за вентилиране в Далмарнок с това на апартаментните сгради в България е именно една от предпоставките за това. Втората е сходното количество на горимите материали, представено в експеримента и тези в жилищно помещение.

На базата на създадения метод е регулирано моделирането на пожари в ограничени жилищни пространства с цел оценка на разпространението на стихията през стъклените прегради към горната кота на сградата. Така представена, хронологията на изследването дава възможност за допълнителни модификации и индивидуален подход към симулационния анализ на всеки конкретен обект.

С предложеното приложение на метода при реално жилищно помещение се доказва ясното преимущество на числените изследвания спрямо експерименталните. Лесно и бързо могат да бъдат модифицирани или адаптирани параметрите на началните и гранични условия в зависимост от целите на изследването. Също така, определянето на пожара и общото количество на топлинния товар е сведено на инженерно ниво.

На базата на численото изследване на пожар са определени зависимости и заключения за определеното жилищно помещение. Установени са три типа развие на пожара в зависимост от вентилационните условия в тестовата стая:

- при крайно неблагоприятни условия в жилището пожарът не достига до *пълно разпалване на помещението* и след фазата на *разпалване* преминава в плавно тлеене;
- при неблагоприятни условия в жилището пожарът не достига до *пълно разпалване на помещението*, но просмукването на въздух през

наличните отвори е достатъчно за поддържането на температура на самозапалване на горимите обекти;

- при третия тип развитие пожарът достига до *пълно разпалване на помещението* като температурата на газовата фаза в обема на жилището е над критичната стойност $T_{\text{wind,gases}} = 600$ [°C] за разпад на стъклените прегради от двоен стъклопакет.

При анализа с различни режими на климатичните условия са определени следните закономерности и заключения:

- скоростният профил на вятъра оказва значително влияние на възможността за разпространение на пожара през стъклените прегради;
- при посока на вятъра, успоредна на фасадата на сградата, вероятността за създаване на условия за разбиване на стъклените прегради на помещението, разположено непосредствено над тестовото е по-малка. Продуктите на горене са насочени встрани от най-близкия прозорец на горното жилищно пространство и съответно са по-разпръснати. По този начин се намалява тяхното критично въздействие;
- при посока, напречна на фасадата на сградата има значително по-голям риск от разбиване на стъклените прегради на горната кота.

С провеждането на GISol се демонстрира правилният подход, предложения в метод за изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в жилищно пространство, базиран на CFD *Полеви* модел. На базата на финалния анализ е оценена вероятността от разпалване на пожара в помещението, разположено на горната кота над тестовото. Числените резултати от изследването водят до следните заключения:

- симулациите, базирани на мрежата, определена в GIS, потвърждават направените заключения в предходните изследвания в *Стъпки 5 и 6* от метода;
- най-голям риск от разпространение на пожара съществува при наличието на компонента на профила на вятъра, насочена перпендикулярно към прозорец, представляващ интерес за изследването. Разбиването на стъклените прегради и на двете помещения допринася за прилепянето на струята от продукти на горене (дим и летливи) към външната фасада на сградата, както и до съответното навлизане на опасните газове в обема на горното помещение;
- при липсата на компонент на вятъра, перпендикулярен на фасадата, се наблюдава образуването на течение от отвора на вратата към прозореца на горното помещение, което от своя страна допринася за отлепянето и съответно до отдалечаването на пристенната струя от

горещи газове, образувана от пожара. В такъв случай рискът от разпространение е значително по-малък;

- режимите на вентилиране на горното помещение също оказват влияние на образуваните неизотермични течения от пожара. Тяхното въздействие изисква допълнителен анализ.

С метода за изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в жилищно пространство се дава възможност за лесно анализиране на различни режими и постановки на сградата, която е от интерес за проучването. Много бързо след изграждането на основния геометричен модел и определянето на горивните източници за съответното помещение може да се модифицират различните параметри. Така единственото, от което зависи успешното изпълнение на численото изследване е сигурна компютърна система, предоставяща паралелно изчисление.

Прилагането на CFD за анализиране на пожари в ограничени пространства е незаменима алтернатива на реалните пожарни тестове. Независимо от това, все още остава въпросът за моделирането на горивните източници и необходимостта от определянето на калориметричните стойности на обектите. Без коректни времеви функции, задаващи отделянето на летливите, е възможно значително отклонение на числените резултати от реалността. Директното моделиране на процесите на горене на този етап се намират в сферата на активните проучвания. Така връзката между числените симулации и експерименталните изследвания за определяне на характеристиките на горивните източници остава неразривна.

4. Основни приноси

Научно – приложни приноси

- Разработен и приложен е метод за изследване на развитието и разпространението през стъклените прегради на пожар в ограничено жилищно пространство, базиран на CFD *Полеви* модел.
- Анализирано и оценено е влиянието на климатичните условия върху развитието на пожар в ограничено пространство.

Приложни приноси

- Проведено е експериментално изследване в жилищно помещение за дефиниране на началните и гранични условия, необходими за целите на моделирането на пожар.
- Създадена е база данни с числени резултати на пожари в жилищни пространства.
- Направен е многопараметричен анализ на развитието на пожар в ограничено жилищно пространство, както и на неговото разпространение във вертикална посока през стъклени прегради.

5. Публикации свързани с дисертацията

Mijorski, S., Stankov, P., “Computer Simulations of Fires in Road Tunnels: Present Status and Perspectives”, 15th National Scientific Conference - Energy, Ecology, Comfort and Self-Confidence Proceeding, Sozopol, Bulgaria, 16-19 September, ISSN 1310 – 9405, pp 47-52.

Mijorski, S., Stankov, P., “Field Model in Fire Safety Engineering”, Third International Course Proceeding, Numerical Heat Transfer, Kopaonik, Serbia, 01-06 October 2011, ISBN 978 86-6055-017-2, pp 175-186.

Mijorski, S., “Numerical Predictions on the Influence of Air Exchange Rate on Temperature Fields During Compartment Fire”, International Science Conference Proceeding, Gabrovo, Bulgaria, 18-19 November 2011, ISSN 1313-230x, Volume II, pp 356-360.

Mijorski, S., Stankov, P., “CFD Modelling of Dalmarnock Uncontrolled Fire Test”, Central European Journal of Engineering 2(2), May 2012, p-p 279-288, DOI: 10.2478/s13531-011- 0064-z.

6. Abstract of the PhD Thesis

PhD Thesis-Title: “Modelling of Non-Isothermal Air Flows In the Emergence and Spreading of Fires”

Fires with their nature and physics are an essential danger for human health and life. The disaster has tough effect and influence over the environment. Extreme characteristics of fires define very fast and instantly the vital conditions required for living. In contemporary life, people mostly occupy confined spaces, like: residential and community buildings, trade and entertainment centres, metro stations and many others. Specifics of the occupied premises define to great extent the fires, by regulating combustion processes and non-isothermal flows. From great importance are economic consequences, which may arise and can have significant influence over human contemporary life. Closing of tunnels, damaging building's integrity, lost of precious properties or expensive equipment leads to great financial losses. The fire safety investigation arises as main priority during construction of each contemporary building.

The facts defining the increased interest and requirement for detailed understanding of fire processes can be structured in the following list:

- Nowadays people spend about 90% of their lives in confined spaces;
- The life and health of people are highly dependent of indoor conditions. In terms of fire in confined space, the vital conditions are changed very fast endangering the evacuation of the occupants;
- The economic consequences and costs inflicted over infrastructure and human health. Fires in confined spaces can be a reason for substantial financial and non-financial lost.

Another reason for the interest of confined living spaces is the statistics of Ministry of Interior of the Republic of Bulgaria. During the period from 2005 to 2010 with share of 50%, clearly stand out fires in residential buildings. So with their specificity, multi-storey apartment buildings appear as the most important sector in the evaluation of fire safety.

CFD modelling is most appropriate method for analyzing the fire development and spreading. Mathematic approximations are the cheapest and quickest way for conducting an assessment of the risk. The package FDS, as a CFD software is most appropriate for the analyzes of fires in residential buildings, as it offers a convenient interface, a wide range of tools for modelling, an optimized solver for fire simulations and a functional post-processing.

The main aim of the dissertation is detailed analyzes of strongly non-isothermal flows in result of a fire development and spreading in confined spaces. With a wide range of the study of fires, in particular will be investigated multi-storey residential buildings. In the process of conducting the stated science topic following tasks are defined:

- To be analyzed and assessed the influence of the climate conditions over fire development in the confined spaces;
- To be developed and implemented the method for analyzing of fire development and spreading through glazing of the confined space, based on a CFD Field model;
- To be conducted experiment in an apartment for defining of initial and boundary conditions for the aim of fire modelling;
- To be created a database with numerical results of fires in residential spaces;
- To be conducted a multi-parametric analyze of fire development in the confined spaces and fire spreading through glazing in vertical direction.

The thesis is structured in five chapters. In the first part, there has been made a literature survey of the fire characteristics and methods for fire modelling in confined spaces. The survey includes experimental and numerical analyzes in the area of fire safety analyze.

In the second chapter extensive study of the mathematical model is done. The model limitations are listed. Short description of the calculating algorithm is included.

Third chapter includes extensive analyze and assessment of the influence of the climate conditions over development of a fire in confined space. Numerical results are compared with experimental results of a fire test in Dalmarnock, Scotland. The study includes three separated part:

- Grid Independent Study;
- Climate conditions influence analyzes;
- Grid Independent Solutions.

In the fourth chapter, there is detailed description of the method for analyzing of fire development and spreading through glazing of the confined space, based on a CFD Field model. The method comprises 8 sequential steps:

- Step 1: Define the problem - Definition of software packages and a physical model;
- Step 2: Physical model - Measuring the parameters defining the initial and boundary conditions;
- Step 3: CFD Field model - Definition of sub-models;
- Step 4: Grid Independent Study;
- Step 5: Analysis of the fire development;
- Step 6: Analysis of the fire spreading;
- Step 7: Grid Independent Solution;
- Step 8: Conclusions and recommendations.

Last chapter describes the implementation of the method for analyzing of fire development and spreading through glazing of the confined space. Experimental compartment subject to the study is located in Sofia, Bulgaria. Modelling of the fire is based on measuring the dimensions and weight of all sources located in the test compartment.