



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**Факултет ЕНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЕН
Катедра ХИДРОАЕРОДИНАМИКА И ХИДРАВЛИЧНИ МАШИНИ.**

Маг. инж. Хрисимир Христов Дочев

ДИНАМИКА НА ГОРСКИТЕ ПОЖАРИ)

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: 5.1. Машинно инженерство

Докторска програма „Механика на флуидите“

Научен ръководител: Проф. д-р Иван Антонов

СОФИЯ, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Хидроаеродинамика и хидравлични машини“ към Факултет Енергомашиностроителен на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 02.07.2026 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 19.10.2026 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.1-43/14.07.2026 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

Вътрешни за ТУ-София

1. Проф. д-р Ангел Костадинов Терзиев – ПН 5.1 Машинно инженерство – председател
2. Проф. д-р Росица Тодорова Величкова - ПН 5.1 Машинно инженерство

Резервен член :Доц. д-р Искра Сашова Симова - ПН 5.1 Машинно инженерство

Външни за ТУ

1. Проф. д-р Милчо Стоянов Ангелов – УХТ-Пловдив - ПН 5.1 Машинно инженерство
2. Доц. д-р Иван Тодоров Тодоров – Академия на МВР – ПН 5.7 Архитектура, строителство и геодезия
3. Доц. д-р Христо Костадинов Проданов - Академия на МВР – ПН 5.7 Архитектура, строителство и геодезия

Резервен член: Доц. Пенка Нелиева Златева – ТУ-Варна – ПН. 5.4. Енергетика

Рецензенти:

1. Проф. д-р Милчо Стоянов Ангелов – УХТ-Пловдив
2. Доц. д-р Иван Тодоров Тодоров – Академия на МВР

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

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Хидроаеродинамика и хидравлични машини“ на факултет Енергомашиностроителен. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Хрисимир Дочев

Заглавие: Динамика на горските пожари

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Актуалността на изследването се определя от изключително голямата опасност, която представляват за България горските пожари през последните няколко десетилетия на 20 век и в началото на 21 век. Тежката пожарна обстановка, която се създава в горските масиви на България говори за наличието на сериозни проблеми както в превенцията на горските пожари, така и при организацията на тяхното гасене.

Оформя се изводът, че в рамките на последното десетилетие на 20 и първите десетилетия на 21 век, България от страна със сравнително нисък пожарен риск в горите се е превърнала в страна, където проблемът с горските пожари не само е възникнал, но е прераснал в толкова сериозен, че налага търсенето и прилагането на съвсем нов подход в превенцията и борбата с горските пожари. Нещо повече, България се нуждае от прилагането на такава противопожарна практика в горите, която да е съизмерима с практиките на водещите в тази област Европейски и други държави.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Цел на дисертационния труд е да се извърши комплексно изучаване и анализ на съвременното състояние на пожарната обстановка в горите на България и на системата за управление на горските пожари, включваща двата основни компонента: превенция и гасене.

В изпълнение на тази цел, са формулирани следните основни задачи:

1. Чрез провеждане на изследвания в лабораторни условия, да се определи поведението при запалване и горене на иглолистна и широколистна горска постилка;
2. След извършване анализ на резултатите от проведения експеримент, да се предложи метод за обемно (масово) експериментално определяне на линейната скорост на разпространение на горски пожар от различен по вид горски постилки;
3. Да се извърши анализ на пожарната обстановка в горите на България в края на 20 и началото на 21 век и се оцени състоянието и ефективността на системата за превенция и реакция при възникването на горски пожари;
4. Да се извърши анализ на нормативната уредба, регламентираща превенцията и гасенето на горски пожари в България и се предложат мерки за нейното подобряване.

За изпълнение на поставената цел на дисертационния труд е приложен интердисциплинарен подход, предвид факта че динамиката на горските пожари представлява сложен многофакторен процес, изследването на който изисква прилагането на различни научни методи.

За успешното решаване на задачите, поставени в дисертационния труд, е използвана комплексна изследователска методология, която включва съчетаване на методи за статистически анализ, оценка и прогноза, експериментални изследвания, математическа обработка на получените резултати, инженерно моделиране и нормативен анализ.

Научна новост

Проведените изследвания имат за цел изучаване и моделиране поведението на пожар в еднородни и нееднородни горски горивни пластове, съставляващи мъртва горска постилка и по своята същност те се явяват оригинални за България.

Предложеният обемен (масов) метод за определяне скоростта на разпространение на пожар в различни по вид горски постилки, представлява оригинално решение и разширява съществуващите експериментални подходи за анализ на процесите на горене.

Практическа приложимост

Като съществен практически резултат от проведените изследвания, чрез прилагане на разработения масов (обемен) метод, може да се посочи извършеното експериментално определяне на линейните скорости на горене на широколистни и иглолистни горски постилки.

Допълнителен практически принос представляват извлечените количествени зависимости между линейната скорост на горене на иглолистна и широколистна горска постилка и влагосъдържанието и началната им температура. Получените данни могат да намерят практическо приложение при оценка на пожарния риск в горските масиви, чрез използване на налични метеоданни.

Ценен практически резултат от дисертационния труд представлява определянето на индексите на месечната и денонощната сезонност на възникналите в България горски пожари. Чрез тях количествено се характеризира вероятността за възникване на горски пожари през различните периоди на годината и часови интервали на денонощието. Получените резултати имат значителна практическа стойност за планиране на превантивните мероприятия и ресурсното осигуряване на противопожарните служби.

Апробация

Резултатите от проведените изследвания са докладвани на 18th International Conference on 'Communications, Electromagnetics and Medical Applications' (CEMA'24), и 19th International Conference on 'Communications, Electromagnetics and Medical Applications' (CEMA'25).

Чрез използване, на получените по експериментален път данни, са определени практически зависимостите на линейната скорост на горене на иглолистна и широколистна горски постилки, във функция на влажността и началната температура им.

Производителността на предложената многослойна комуникационна архитектура, е валидирана, чрез проведена подробна мрежова симулация с помощта на NS-3 (Network Simulator 3), симулатор на дискретни събития. Симулацията е конфигурирана с висококачествен цифров модел на терена на планинската верига Рила в България и е проведена при определен оперативен сценарий, предназначен да тества системата при реални натоварване и условия на околната среда.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 4 броя научни статии, от които 1 брой е самостоятелна.

Всички публикации по тематиката на докторския труд са докладвани на международни научни форуми – 18 и 19 International Conference on 'Communications, Electromagnetics and Medical Applications' (CEMA'24) и (CEMA'25) и са индексирани в Scopus.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **225** страници, като включва увод, пет глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **124** литературни източници, като **22** са на латиница и **81** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **41** фигури в основната част и **120** фигури в приложения, и **18** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

УВОД.

Горите на България са част от европейското и световно горско богатство. Те имат глобално и национално екологично, икономическо, социално и културно значение.

Страната ни се характеризира с голямо разнообразие на растителни и животински съобщества, като на територията ѝ се срещат почти всички основни типове местообитания и биотопи, известни в Европа. Разпространени са и някои много редки ендемични видове, характерни само за нашите географски ширини. Това е обусловено от географското разположение на България между три зони на границата на стария континент и Централна Азия.

Земите и горите от горския фонд на България съхраняват над 80 % от защитените растения и над 60 % от застрашените от изчезване видове животни в страната. За опазване на това разнообразие, на територията на страната са обособени 3 национални парка, 10 природни парка, 55 резервата и 35 поддържани резервата.

Наред с проблеми, свързани с интензивното използване на горите, растителното и биологичното разнообразие на България е изправено и пред едно ново предизвикателство - горските пожари.

СЪВРЕМЕННО СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Към 31.12.2024 година общата площ на горите и горските територии в България е 4 283 668 ха, от която залесена (вкл. и клек) – 3 939 110 хектара [2]. Площта на горските територии е 3 952 622 ha (92,27 % от общата), а площта на земеделските територии, притежаващи характеристика на гора по смисъла на чл. 2 от Закона за горите ("гори върху земеделски територии"), е 331 046 ha (7,73 % от общата площ).

Горите на България, флората и фауната в тях са от изключително важно значение за нашата страна.

Естествената растителност е основен фактор при формирането на природната среда и за поддържане на нейното равновесие. Различните типове растителност имат голямо климатично, водорегулиращо и почвозащитно значение, като съществена е функцията на горската растителност.

По литературни данни [4] до преди две-три десетилетия на гората се е отдавало внимание основно върху стопанското ѝ значение като източник на дървесина, паша, лов и за някои други странични дейности. Ролята ѝ като решаващ екологичен фактор, културно-историческото, рекреативното и други значения са били

пренебрегвани. Едва в края на 19 и началото на 20 век в нашата страна започва да се обръща внимание и на противоерозионното значение на гората.

Горските насаждения имат значителна роля за намаляване емисиите от парникови газове в атмосферата, като свързват въглерода в натрупаната биомаса и фактически поглъщат CO₂. Българските гори осигуряват около 85% от водния отток в страната или около 3.6 млрд. m³ ресурс от чиста питейна вода.

Всяка година, в резултат на възникналите пожари в Българи биват унищожавани хиляди хектари горски насаждения, вследствие на което се търпят огромни икономически загуби. Неизмерими са вредите, които се нанасят на флората и фауната и екологичното равновесие. В атмосферата се отделят големи количества вредни вещества, нарушава се водният баланс, отвяват се фините частици от почвата, създават се предпоставки за ерозия на земните площи [22].

В резултат на горските пожари, се унищожават ценни и редки растителни и животински видове, за чието възстановяване впоследствие са необходими десетки и повече години, а в някои случаи изобщо не е възможно рехабилитиране на унищожените екосистеми.

Не следва да се пренебрегват и човешките жертви, причинени от горските пожари или дадени в борбата с тях. Често пъти значителни размери добиват щетите нанесени на специализирана техника и оборудване, използвани за гасенето на възникналите стихии в горите.

Статистическите данни за България показват, че до края на 80-те години на миналия век, основните показатели, характеризиращи динамиката на възникналите горски пожари, имат относително постоянни измерения-средно годишно са опожарявани (800-3000) ha гори.

Последното десетилетие на миналия век и началните години на 21 век се характеризират с драстична промяна и усложняване на пожарната обстановка в горите на България. Броят на възникналите горски пожари се увеличава над 6 пъти, а средногодишното количество на опожарените площи с горски насаждения достига 112 000 ha. Проблемът с горските пожари придобива кризисен характер, а за 1999-2001 г. положението може да се определи като катастрофално. През 2000 г., характеризираща се с най-сложна пожарна обстановка, са унищожени над 40 000 ha горски насаждения [25], [26], [27].

Аналогична тенденция се наблюдава през 2006 г. и 2007 г., като средно годишно са унищожени 95 000 ha горски насаждения.

Възникналите в България опустошителни горски пожари засегнаха не виждани до момента територии и унищожиха огромни площи с горски насаждения. Това, което е създавано в продължение на

десетилетия и столетия, беше унищожено напълно от огнената стихия.

ГЛАВА ПЪРВА

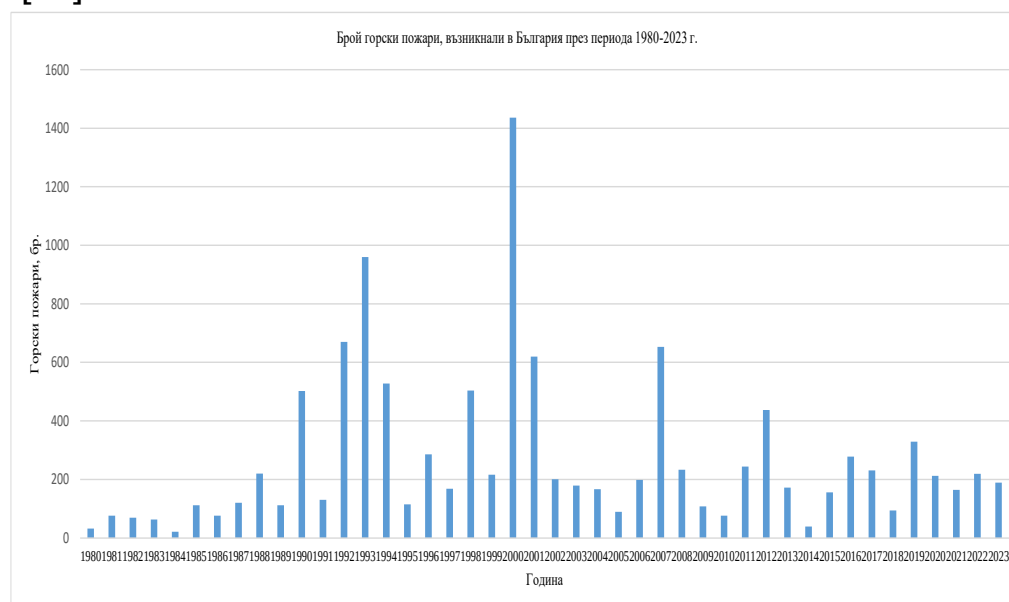
АНАЛИЗ НА ПОЖАРНАТА ОБСТАНОВКА В ГОРИТЕ НА БЪЛГАРИЯ И ОЦЕНКА НА СИСТЕМАТА ЗА ПОЖАРЕН МЕНИДЖМЪНТ

Целта на изследването в глава първа е да се извърши анализ на пожарната обстановка в горския фонд на Р България, като се използва наличната информация в базата данни на ГДПБЗН-МВР [22], [23].

Основната задача е да се проследи динамиката и числените показатели на пожарната ситуация в горите на България в края на 19 и началото на 20 век, като се използват данни, които са част от официалната база данни на Автоматизирана информационна система (БД АИС) „Произшествия“ на ГДПБЗН-МВР [22].

На база на извършения анализ да се набележат адекватни мерки за подобряване на превенцията на пожарната обстановка в горите на България.

Всички изчисления, резултати и сравнения на показатели, свързани с пожарната ситуация в горския сектор и отнасящи се до горски площи, са приведени към данните, изнесени в Годишен доклад ИАГ-2023 г. [31].



Фигура .1.1.2 Разпределение по години на броя горски пожари, възникнали в България през периода 1980-2023 г.

На база на извършения анализ могат да се направят следните основни изводи:

1. Най-малко горски пожари за изследвания 44 период са възникнали през 1984 г. - с 21 броя, което е 12,66 пъти по-малко в сравнение със средногодишния брой за целия 44 годишен период.

2. Най-много горски пожари за изследвания 44 период са възникнали през 2000 г. – 1436 броя, което е 5,40 пъти повече спрямо средногодишния брой за целия 44 годишен период;

3. Причините за възникване на горските пожари са от различен характер, но основно те са свързани с човешката дейност, като повече от 30 % са с неустановен характер. Последното води да извода че процесът по разследване на горските пожари в България не е приоритетен и често той се negliжира

4. Независимо от различната динамика в отделните години и въпреки предприеманите мерки, средногодишният брой на пожарите след 2000 г., показва трайно устойчив характер на нарастване.

ГЛАВА ВТОРА

ОПРЕДЕЛЯНЕ ИНДЕКСИТЕ НА МЕСЕЧНА И ДЕНОНОЩНА СЕЗОННОСТ НА ГОРСКИТЕ ПОЖАРИ В БЪЛГАРИЯ

В глава втора е извършен анализ и оценка на месечната и денонощна сезонност на възникване на горски пожари на територията на Р България. За целта са използвани статистически данни за минал 43 годишен период при определяне на месечната сезонност и 26 годишен период – съответно за денонощната сезонност [22].

С помощта на подходящ математически метод е извършена обработка и анализ на наличните статистически данни за възникналите горски пожари на територията на Р България.

Направеният анализ позволява използването на получените резултати за предприемане на съответни превантивни мерки и планирането на определени управленски решения за борба с горските пожари в България.

Изчислени са индексите на месечните сезонни колебания I_s , като графично те са представени на фиг.2.1.12



Фиг.2.1.2. Индекс на сезонност на възникване на горските пожари в България през периода 1980-2023 г.

Установена е подчертана месечна цикличност при възникване на горски пожари в България, която се характеризира с два основни пика, първият и най-голям през месец август, а вторият – през месец март на календарната година.

Изчислени са денонощните индекси на сезонните колебания I_s , като графично те са представени на фиг.2.3.8.



Фиг. 2.2.7. Индекс на денонощна цикличност на горските пожари в България по час на възникване за периода 1995-2021 г.

Установена е денонощна цикличност на възникване на горските пожари в България, като най-вероятен час е определен 16:00 часа от денонощието

На база резултатите от извършените анализи в раздел 2.1 и раздел 2. 2 на глава втора, като основен извод може да се изтъкне, че най-голяма вероятност от възникване на горски пожари в България съществува през месец август на календарната година и в 16:00 часа на денонощието.

ГЛАВА ТРЕТА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЧАСТ

3.1. Методология на изследванията. Експериментална екипировка.

Горските и полските пожари се характеризират с горене преди всичко на горими материали от растителен произход. Това понятие трябва да се обобщи с горене на горската постилка, тревната растителност, храсти а при върховите пожари – и дървета. На развитието на процеса значително влияние оказват условията на околната среда, ландшафта и параметрите на въздуха – скорост и посока на вятъра, температура и влажност.

Една от целите в настоящото изследване е да се опише модела, обхващащ проблема на горене на еднородни и нееднородни слоеве природни горими материали и развитие на възникналото конвективно течение над тях. Слоевите са съставен от мъртва горска постилка.

Докато осъществяваният мащабен мониторинг разчита на сателитни изображения и метеорологични данни, запалването и първоначалното разпространение на горския пожар се управляват от процеси, които протичат в микромащаб, в рамките на горивния слой на горската постилка. Съставът и състоянието на този слой, съставен предимно от горска отпаднала маса, са критични фактори, които определят общия риск от пожар [69].

В сферата на управление на горите в България е възприето понятието "Мъртва горска постилка", конкретна дефиниция за което е дадена в [37] а именно: "Мъртвата горска постилка е надпочвен органичен пласт, формиран от отпаднала дървесна и друга растителна маса".

Точността на оценката на риска от горски пожари и моделирането на поведението на пожарите е критично зависима от прецизното характеризиране на горските горивни пластове, съставляващи мъртвата горска постилка.

В умерени, смесени гори, мъртвата горска постилка често е сложна мозайка от видове горива, съставена предимно от отпадъци както от широколистни, така и от иглолистни дървесни видове. Тези видове отпадъци притежават различни физични и химични свойства – като съотношение на уплътняване, съотношение повърхност-обем и химичен състав – които значително влияят върху динамиката им на горене и общата им запалимост

Въпреки тези разлики, съвременните широкомащабни модели, описващи опасността на горива, често опростяват тази сложност, третирайки смесените отпадъци като единична, хомогенна маса. Това обобщение може да доведе до значителни неточности при прогнозиране на разпространението и интензивността на пожара. Ключово предизвикателство е липсата на ефективни техники за

дистанционно наблюдение, способни да разграничат тези видове горива на нивото на земята, особено под гъста горска корона. Докато оптичните и инфрачервените методи имат ограничения поради заглушаване (засенчване) от короната, използването на нискочестотен радар, който има по-добри възможности за проникване, остава до голяма степен неизследван път за това специфично приложение.

Другата основна цел на настоящото изследване е да се предложи нов подход за дистанционно класифициране на видовете горива чрез корелиране на поведението им при горене с техните UHF радарни сигнатури за обратно разсейване. Допуска се, че структурните разлики между широколистната и иглолистната горски постилки водят до различна динамика на изпаряване на влагата по време на началната фаза на развитие на пожара.

Задачата е експериментално да се изследва тази хипотеза. За целта ще се извърши сравнителен анализ на динамиката на горенето и едновременните измервания на обратното разсейване с UHF радар както за широколистна, така и за иглолистна мъртва горска постилка при контролирани лабораторни условия.

Като крайна практическа цел на експеримента, е да се определи дали съществува уникална радарна сигнатура, която може да се използва за надеждно разграничаване на тези видове гориво, като по този начин се осигури нов метод за създаване на по-точни карти на горивата с висока резолюция за усъвършенстване на моделите за пожарна опасност.

Проби от широколистна мъртва горска постилка, съставена предимно от листа от *Quercus robur* (английски дъб) и *Fagus sylvatica* (европейски бук), са събрани от смесена гора с умерен климат.

След кондициониране в камера с контролирана влажност, на широколистната горска постилка е извършена базова термофизична характеристика, за да се установят основните ѝ свойства. Резултатите, обобщени в Таблица 3.1.1, показват висок горивен потенциал, като летливите твърди вещества съставляват над 90% от общото сухо вещество, дори при различни нива на влажност.

Таблица 3.1.1 Базови свойства на проби от широколистна горска постилка

Проба	Влагосъдържание (%)	Твърди летливи (% of TS)
1.	10.4	92.1
2.	17.7	90.7

За сравнение, са подготвени и проби от иглолистна мъртва горска постилка, доминирана от *Pinus sp.* [70] и *Pinus sylvestris*.

Събраният материал се състои от хетерогенна смес от иглички, малки клонки и фрагменти от кора. Преди горенето и диелектричния анализ, е извършен анализ за базовата характеристика на горивото, за да се установят основните му свойства. Резултатите от този първоначален анализ са обобщени в Таблица 3.1.2. Установено е, че горската постилка притежава киселинни свойства (pH 4,2), с висок дял на горим органичен материал, което показва значителен горивен потенциал.

Таблица 3.1.2. Базови термофизични свойства на иглолистна горска постилка

Параметър	Стойност
Съдържание на влага (поле, %)	13.3 ± 0.8
pH	4.2
Летливи твърди вещества (% от общото количество твърди вещества)	67.1 ± 1.2
Съдържание на пепел (% от общото количество твърди вещества)	32.9 ± 1.2

Иглолистната горска постилка, по-специално представлява лесно запалим източник на гориво поради химичния си състав и физическа структура. Нейните термофизични свойства – като съдържание на влага, обемна плътност и съдържание на летливи твърди вещества – пряко влияят върху нейната запалимост и поведение на горене. Традиционните системи за ранно предупреждение обаче често нямат достатъчно точност, за да наблюдават тези ключови параметри на нивото на горивото в реално време. Това създава критична празнина във възможностите за откриване, тъй като значителни промени в риска от пожар на нивото на земята могат да настъпят бързо, много преди да бъдат открити чрез методи за дистанционно наблюдение.

За да се преодолее тази празнина, е необходим нов подход, който директно свързва основните свойства на горивото с решение за техническо наблюдение.

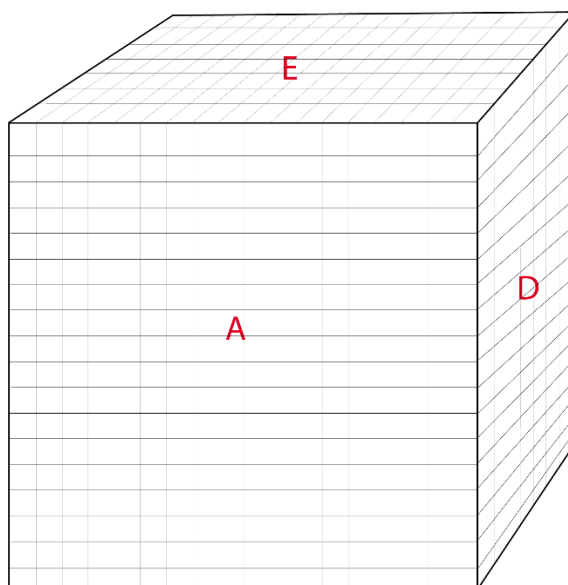
Целта на проведения експеримент е двойна: първо, да се извърши подробна термофизична характеристика на иглолистната горска постилка, за да се определи количествено поведението ѝ при горене; и второ, да се демонстрира как тези свойства могат да бъдат корелирани с параметри, измервани чрез сензорни възли с ниска мощност. По-конкретно, изследвана е връзката между диелектричните свойства на горивото и времето му до запалване, наблюдавано чрез термодвойни решетки и термовизионно изображение [71]. Крайната цел е да се създаде научно обоснована основа за ново поколение *in-situ*, технически подпомогнати системи за ранно предупреждение,

способни да предоставят навременни и точни предупреждения въз основа на действителното състояние на горивния пласт в гората.

Подробна информация за местата на вземане на проби и начинът на пробовземане е дадена в Приложение III.

Опитите с горене, при осъществения експеримент, са проведени в специално изработен калориметъричен куб с дължина на страната 21 cm (калориметър), който осигурява контролирана среда за нагряване и позволява измерване на скоростта на отделяне на топлина.

Схематично представяне на калориметъра е дадено на фигура 3.1.1.



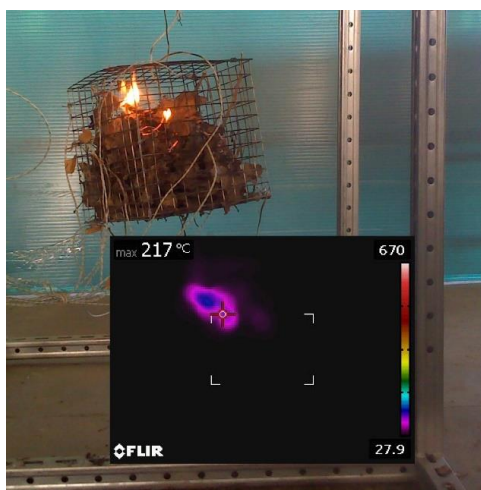
Фигура 3.1.1. Схема на изпитвателен калориметър

За да се следи развитието на температурата по време на експериментите, установката е оборудвана с масив от 16 термоелектрически преобразуватели (термодвойки) тип – „K. Те са стратегически разположени, за да записват температури както по повърхностните стени, така и в обема на горивната проба и температурата на околното среда.

Схематично представяне на условното обозначаване на стените на калориметъра и разположението на термодвойките е дадено на фигура 5.2.

е разположена термовизионна камера FLIR E40 с ясен изглед към повърхността на пробата. Термовизионните данни са използвани за визуално потвърждаване на точния момент на запалване и за наблюдение на разпространението на фронта на пламъка през слоя от гориво

Това позволи прецизна пространствена идентификация на точката на запалване и проследяване в реално време на разпространението на фронта на пламъка по повърхността на пробата (фиг. 3.1.5).



Фигура 3.1.5. Разпространение на фронта на пламъка по повърхността на пробата и термографско изображение

Второ, в пробата от горска постилка е вградена коаксиална сонда с отворен край с честота 10 GHz, за да се измерва непрекъснато нейната комплексна диелектрична проникваемост (ϵ^*) [73].

За измерване на обратното разсейване от пробата по време на процеса на нагряване и горене е използвана радарна система с непрекъснатата вълна (CW) от 450 MHz. Системата е конфигурирана да записва интензитета (в dB) на обратно разсеяния сигнал с течение на времето. Ключов аспект на експерименталния дизайн е синхронизирането на всички потоци от данни.

Данните от термодвойките, термокамерата FLIR E40 и UHF радарната система се записват на всеки 10 секунди от централно устройство за събиране на данни, което регистрира времето на всяко измерване.

За целите на експеримента са използвани технически средства за измерване от одобрен тип за ползване на територията на Република България. Същите са с редовен калибрационен статус към момента на провеждане на експеримента.

Информация за параметрите на използваните технически средства за измерване се съдържа в таблица 3.1.1.

Таблица 3.1.1. Параметри на използваните технически средства за измерване.

№ по ред	Наименование, тип, идентификационен номер	Обхват на измерване, точност	Неопределеност на измерването
1.	Термохигрометър цифров 608-H1, №34817326	5,0°C 20,0°C 40,0°C 30% 80%	[5±0,15]°C [20±0,14]°C [40±0,14]°C [30±1,3] %rh [80±1,4] %rh
2	Термохигрометър цифров „Тесто“ 610, сер. № 39273594/809.	5,0°C 20,0°C 40,0°C 30% 80%	[5±0,15]°C [20±0,12]°C [40±0,15]°C [30±1,2] %rh [80±1,3] %rh
3.	Уред за измерване на скоростта на движение на въздуха P655-LOG	[0,15-20,0]m/s	[0,2±0,1]m/s [3,0±0,12]m/s [5,2±0,15]m/s
4.	Барометър „Тесто 511“, сериен номер 39112763/603	[300 – 1200]hPa; Точност: ± 3.0 % Разделителна способност: 0.1 hPa;	[500±3]hPa
5.	Comeso TC800 – индикатор за многоточков контрол	[0...1600] °C Температурен дрейф-0,005% от обхвата за 1 °C Корекция на “студения” край ± 1 °C, автоматична софтуерна	0,4% от обхвата
6.	ST термодвойка	[-150 – 1600]°C	3,0% от обхвата

Горенето е иницирано с помощта на калибриран източник на топлина, за да се осигури повтораемост. По време на фазите на предварително нагряване и горене, данните от термодвойките, термокамерата и диелектричната сонда непрекъснато се регистрират. „Времето до запалване“ е определено като времето, изминало от

активирането на източника на запалване и поднасянето му към горската постилка, до първия видим признак на продължително пламване, потвърден от данните от термовизионното изображение.

3.2. Визуално изследване развитието на горене при еднородни горски постилки.

Дата на провеждане на експеримента – 29 юли 2023 година.

Място на провеждане – село Костенец, лабораторен комплекс F-plus.

Условия на провеждане:

- атмосферно налягане $P = 936,2 \text{ hPa}$;
- температура на околната среда $T_{\text{ок. среда}} = 26,9^\circ \text{ C}$;
- влажност на въздуха $Ph_{\text{възд.}} = 38,2 \%$

За всеки експериментален опит се подготвя проба с определена маса, чрез претегляне на определено количество от кондиционираната широколистна и иглолистна горска постилка

В проведения лабораторен експеримент бяха извършени общо осем опита. Първите четири от тях са описани в основната част на дисертационния труд, а останалите – в приложение V.

3.2.1. Първи опит.



Опит 1- подготовка и запълване на калориметъра с горска постилка.

Претеглени са 60 g от горската постилка от дъбов шума, след което същите са поставени в подготвения за целта експериментален калориметър.



Опит 1 – фаза „запалване“. Извършено е от горната част на калориметъра, откъм стена „С“ на калориметъра.



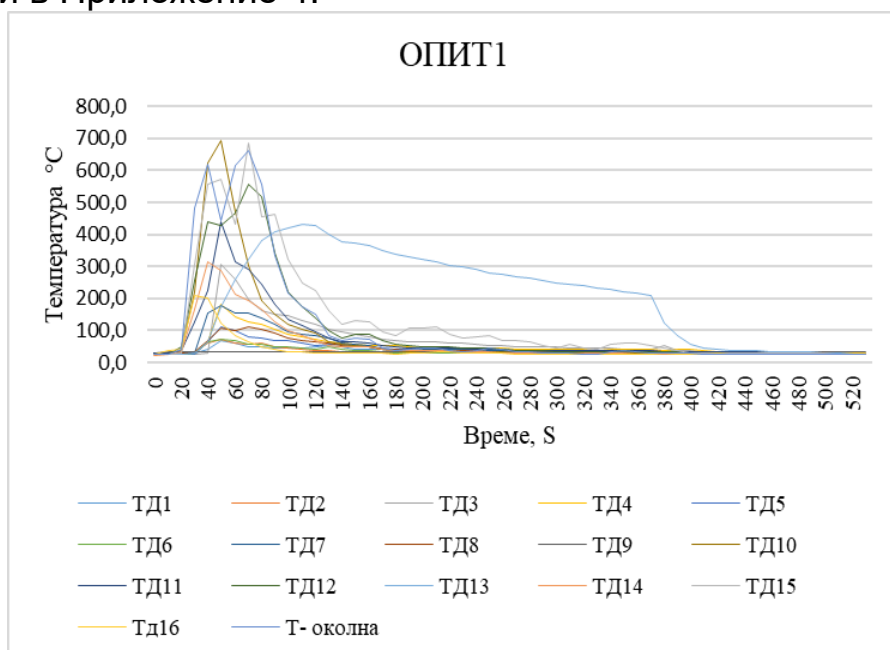
Опит 1 – фаза на максимално горене.



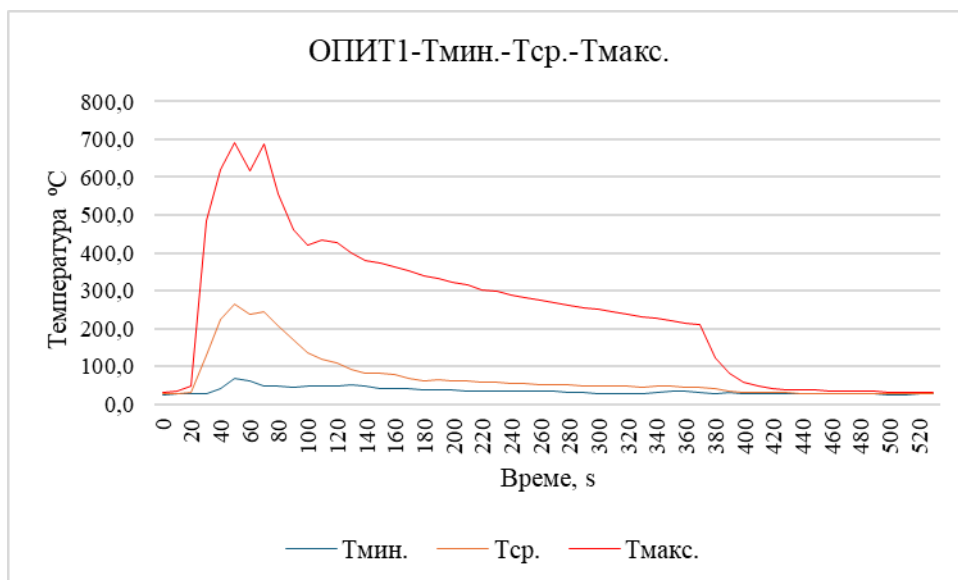
Опит 1 – фаза на горене под формата на тлеене.

На фигури 3.2.1.1 и 3.2.1.2 са представени графиките на измерените температури от всяка една термодвойка и графиките за минималната, средната и максималната температури, отчетени при опита.

Графики, с отчетените температури от термодвойките разположени по отделните стени на експерименталния калориметър, са дадени в Приложение 4.



Фигура 3.2.1.1. Графично представяне на отчетените температури от 16 термодвойки измерени при първи опит



Фигура 3.2.1.2 Графично представяне на отчетените минимална, средна и максимална температури, измерени при първи опит.

3.2. Обемен (масов)метод за определяне на скоростта на разпространение на пожар в горска постилка

Скоростта на разпространение на пожар в горска постилка, се явява важен параметър на горския пожар. В повечето случаи, тя е определящ фактор при развитието на пожара, възприетата тактика за неговото погасяване и размера на нанесените щети. Поради тези обстоятелства, изучаването на явлението „скорост на разпространение на горене в горска постилка“ е изключително важно за успешната борба с горските пожари не само от теоретическа, но и от чисто практическа гледна точка.

В лабораторни условия скоростта на разпространение на огъня при прието пламъчно горене може да се определи като:

- време за преминаване между две термодвойки на изследвания образец,
- или
- чрез определяне на скоростта на изгаряне на материалите, запълващи опитния калориметър.

Тъй като вторият метод е по-точен, то по него е направено опитното изследване.

Пълната масова (обемна) скорост на изгаряне се определя с времето на пълното изгаряне (пламъчното горене и тлеенето)- $t_{\text{пи}}$.

$$u_m = \frac{m}{t_{\text{пи}}} \quad (3.3.1)$$

където: $m = \rho \cdot W_k$ – произведение на плътността на листната смес по обема на експерименталния калориметър.

От (3.3.1) се пресмята линейната скорост на разпространение на пожара по горската постилка, като:

$$u_{\ell} = \frac{u_m}{\rho \cdot B} \quad (3.3.2)$$

Където: В е напречното сечение на опитния образец.

Опитните изследвания са проведени с подложки от иглолистна и широколистна горска постилка при следните условия:

- плътност на опитния образец – $\rho=6,478 \text{ kg/m}^3$;

- влагосъдържание:

а) широкогорската постилка – $(13,3 \pm 0,8)\%$;

б) за иглолистната постилка – $(10,4 \div 17,7)\%$.

Времетраене на горенето при широкогорска постилка е $t_c=109 \text{ s}$ и скорост на горене $u_{\ell}=1,93=10^{-3} \text{ m/s}=1,92 \text{ mm/s}$.

Времетраене на горенето при иглолистната постилка е $t_c=92 \text{ s}$ и скорост на горене $u_{\ell}=2,28=10^{-3} \text{ m/s}=2,28 \text{ mm/s}$.

По литературни данни [86], [87] са дадени скорости на горене $u_{\ell}=3,3 \text{ mm/s}$, което е незначително завишение в сравнение с проведените изследвания. Необходимо е да се подчертае, че не са точно описани началните условия на упоменатите опити.

Проведен е експеримент и за горене на горската постилка с висока плътност - многогодишен слой.

При широколистната горска постилка и $\rho=32,07 \text{ kg/m}^3$, по описаната методика се получава скорост на линейно разпространение на огъня $u_{\ell}=1,166=10^{-3} \text{ m/s}=1,166 \text{ mm/s}$.

При иглолистната постилка и $\rho=55,83 \text{ kg/m}^3$, $u_{\ell}=1.10^{-3} \text{ m/s}=1 \text{ mm/s}$.

3.4 Фактори, влияещи на върху процеса на разпространение на горенето в горски постилки.

3.5

По литературни данни [86], [87], факторите, влияещи върху процеса на разпространението на горенето в горски постилки, могат да се обособят в две основни групи:

- параметри на околната среда, където протича процесът на горене;
- параметри на горимия материал, участващ в процеса на горене.

Известно е, че параметрите на окръжаващата среда като вятър, особеностите на терена, относителната влажност на въздуха [86], [87], оказват съществено влияние върху процеса на горене в гората.

За зависимостта на скоростта на горене от влагосъдържанието е изведена следната зависимост [86], [87]:

$$u_{\ell} = \frac{u_0}{1 + 7,8 \frac{W}{1 + W}} \quad (3.4.1)$$

където:

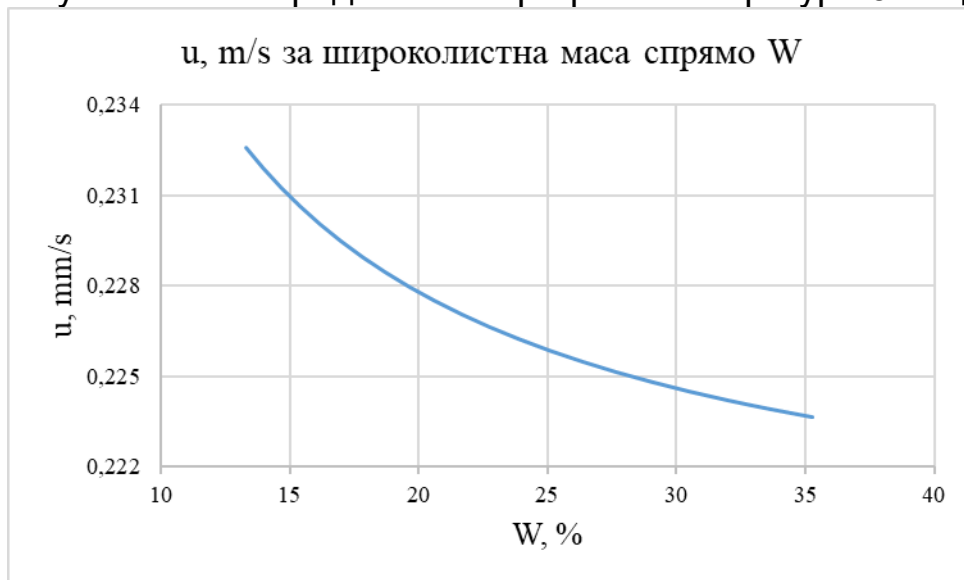
u_{ℓ} - линейна скорост на горене.

u_0 - скорост на горене горската постилка при $T_0=20^{\circ}\text{C}$.

W – влажност на горската постилка при начална температура.

Прилагайки формула 3.4.1. е определено изменението на скоростта на горене във функция на влажността на иглолистна и широколистна горска постилка, като са използвани определените при експеримента стойности на $u_0 = 2,28$ mm/s за широколистна и $u_0 = 1,92$ mm/s за иглолистна горска постилка.

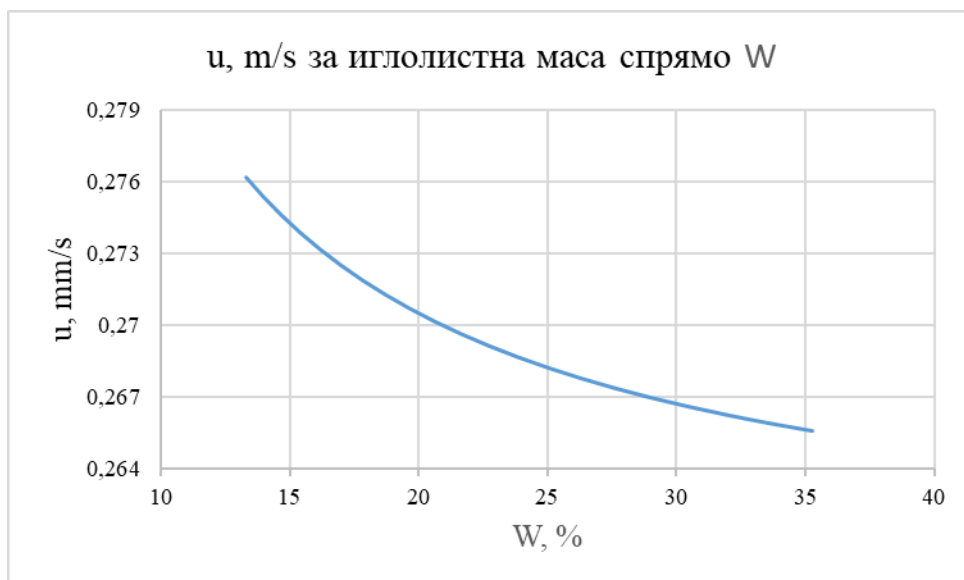
Резултатите са представени графично на фигури 3.4.1 до 3.4.5.



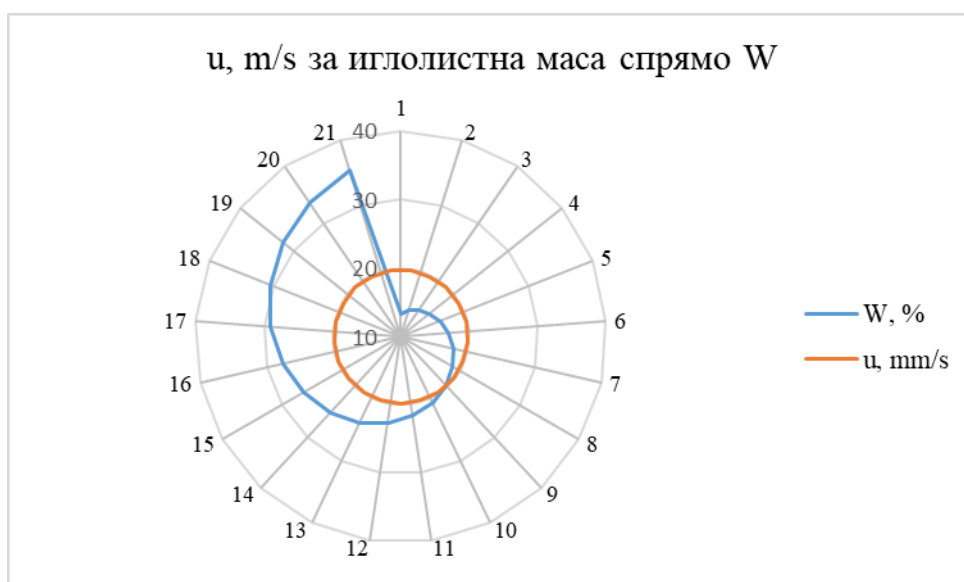
Фиг. 3.4.1 Зависимост на скоростта на горене на широколистна горска постилка спрямо влажността



Фиг. 3.4.2 Зависимост на скоростта на горене на широколистна горска постилка спрямо влажността, изразени в радарна координатна система



Фиг. 3.4.4 Зависимост на скоростта на горене на иглолистна горска постилка спрямо влажността



Фиг. 3.4.5 Зависимост на скоростта на горене на иглолистна горска постилка спрямо влажността

По литературни данни [86], [87], при проведени изследвания за определяне на скоростта на горене на горска постилка при различни начални температури на нагряване, е изведена зависимостта:

$$u_{\ell} = u_0 e^{-0.006T_0} \quad (3.4.2)$$

u_{ℓ} - линейна скорост на горене.

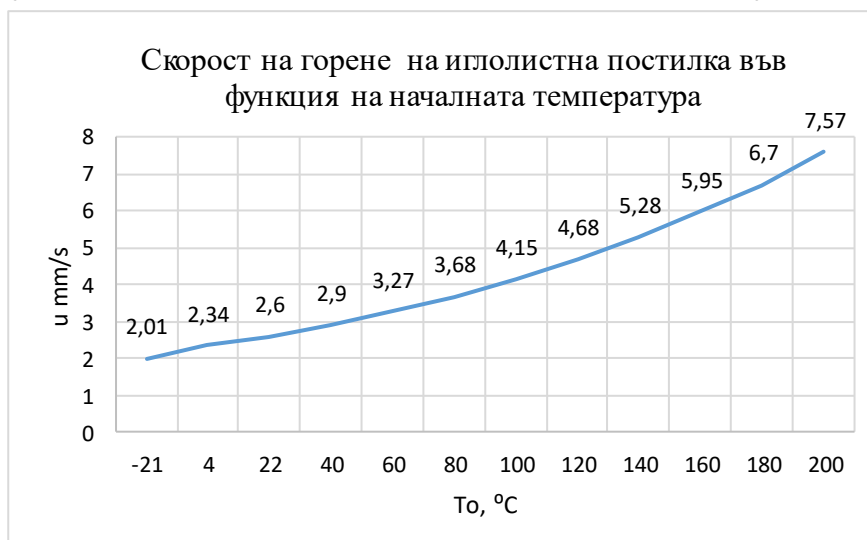
u_0 - скорост на горене горската постилка при $T_0=20^{\circ}\text{C}$.

T_0 – начална температура.

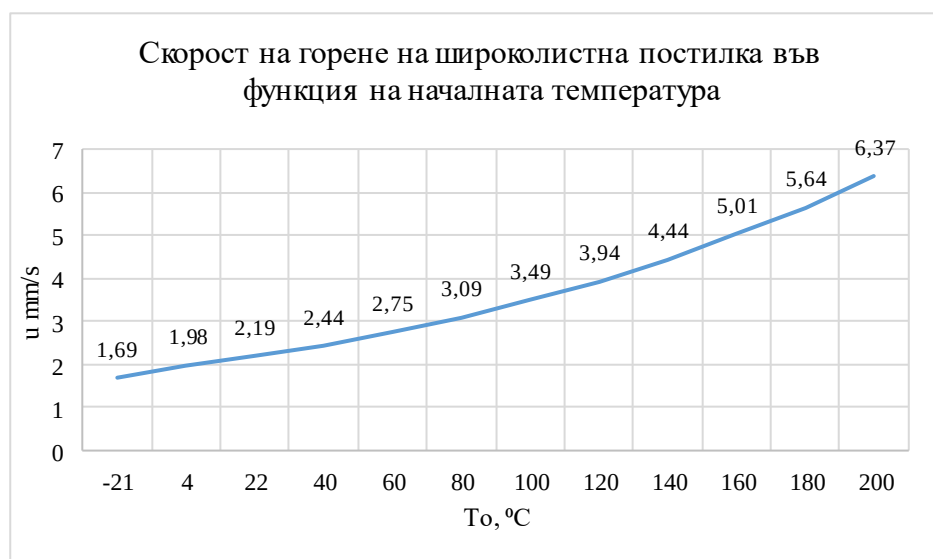
Прилагайки формула 3.4.2. е определено изменението на скоростта на горене при различни температури на иглолистна и широколистна горска постилка, като са използвани определените при

експерименталните стойности на $u_0=2,28$ mm/s за широколистна и $u_0=0,92$ mm/s за иглолистна горска постилка.

Резултатите са представени графично на фигури 3.47 и 3.4.8.



Фиг. 3.4.7. Зависимост на скоростта на горене иглолистна горска постилка от началната температура



Фиг. 3.4.8. Зависимост на скоростта на горене широколистна горска постилка от началната температура

3.5. ИЗВОДИ

От проведените опитни изследвания и анализи следват следните изводи:

3.5.1. Разпространението на пожари в горска постилката зависи от вида ѝ, и степента на влажност.

3.5.2. Постилката от широколистна гора дава по-ниска скорост на придвижване на огъня в сравнение с иглолистната такава, което се дължи на структурата и калоричността ѝ като горивен материал.

5.5.3. При многогодишните добре уплътнени постилки пожарът се разпространява по-слабо, особено при иглолистна и затихва в дълбочина на слоя.

3.5.4. Атмосферата и природните фактори са тези, които влияят най-осезателно върху процеса на придвижване на пожара „до ускоряването му. Трябва да се има в предвид, че опитните изследвания са проведени в лабораторни условия и неподвижни въздушни струи.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА

ИНТЕГРИРАНА КОМУНИКАЦИОННА АРХИТЕКТУРА ЗА РЕАГИРАНЕ ПРИ ГОРСКИ ПОЖАРИ В БЪЛГАРИЯ

Предложената архитектура е проектирана да преодолее установените пропуски в съществуващите системи за координация между службите, отговорни за реагиране при горски пожари, като постигне три основни цели.

Първо, тя има за цел да намали средното време за реакция при инциденти до под 15 минути, като гарантира, че критичните данни достигат бързо до звената на първа линия.

Второ, тя е проектирана да постигне наличност на връзката над 99,5%, осигурявайки устойчива и надеждна мрежа дори при неблагоприятни условия.

И накрая, архитектурата е предназначена да осигури обща оперативна картина, позволявайки стрийминг на видео в реално време и други сензорни данни от мястото на инцидента до командните пунктове [90].

Архитектурата интегрира три отделни, но взаимосвързани комуникационни слоя, за да постигне тези цели:

- Слой 1: Наземни възли на TETRA (глас и нискоскоростни данни): Основата на архитектурата е мрежа от наземни станции за наземно радио (TETRA). Този слой осигурява устойчива, сигурна и, най-важното, оперативно съвместима мрежа за гласова комуникация „push-to-talk“ за всички отговарящи институции, елиминирайки проблемите с несъвместимите стари радиосистеми.

- Слой 2: UAV-LTE релета (фронтна мрежа за данни): За високоскоростно предаване на данни на фронта на пожара, системата разполага с рояк от 60 безпилотни летателни апарата (UAV). Тези UAV действат като летящи LTE (4G/5G) базови станции, създавайки динамичен и самовъзстановяващ се „облак от данни“ над зоната на инцидента.

- Слой 3: L-/Ka-лентов сателитен бекхол (устойчива свързаност): За да се гарантира, че локалната мрежа никога не е изолирана, архитектурата включва два мобилни сателитни шлюза.

Представените мрежови симулации, валидират предложената многослойна комуникационна архитектура като високоефективно решение за модернизиране на способностите на България за реагиране при горски пожари. Ключовите констатации – 56% намаление на средното време за реакция при инциденти и наличност на връзката над 99,7% – демонстрират значително подобрене спрямо настоящата рамка. Значението на тази концепция се състои в нейния интегриран, устойчив дизайн, който гарантира оперативна съвместимост и високоскоростен поток от данни в трудни среди. Тази хибридна мрежа от безпилотни летателни апарати, наземни апарати и спътници, представлява решаваща стъпка напред за българските служби за спешна помощ [94].

ГЛАВА ПЕТА

АНАЛИЗ НА НОРМАТИВНАТА УРЕДБА, РЕГЛА-МЕНТИРАЩА ДЕЙНОСТТА ПО ПРЕВЕНЦИЯ И ГА-СЕНЕ НА ГОРСКИ ПОЖАРИ В БЪЛГАРИЯ

Усложнената пожарна обстановка в горите на България в края на 20 век и началото на 21 век показва, че ефективността на системата за управление на горските пожари не е на необходимото ниво.

Управлението на горските пожари включва два основни вида дейности:

- превантивна дейност - насочена към предотвратяване възникването на горски пожари ;
- оперативна дейност - насочена към гасенето на горски пожари и ликвидиране на последствията от тях.

От особено важно значение за правилното организиране на дейността и по двете направления се явява нормативната уредба.

На база извършения анализ са оформени следните изводи:

- Нормативната уредба в България, регламентираща превенцията на горските пожари включва актове от различен ранг, като част от документите съдържат припокриващи се текстове, а в някои случаи дори има и определени противоречия в тях.
- Повечето от подзаконовите нормативни документи са обвързани с приемането Закона за горите през 2011, но независимо от това, не е изграден единен подход при управлението на горските пожари в България, тъй като дейността на отговорните институции се регламентира с редица специални закони.
- В законовите и подзаконовите актове остава недоразвит въпросът за взаимодействието на силите и средствата, както при осъществяване на превантивна дейност, така и при участие в пожарогасителните действия при горски пожари.

- В критериите за изграждане на ПП подразделения не е взето под внимание наличието на горски и полски масиви в обслужваната територия

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Разработена и експериментално апробирана е методика за изследване на процесите на горене при различни видове горска постилка, позволяваща количествено определяне влиянието на влагосъдържанието, температурата и други фактори върху скоростта на разпространение на горенето.

2. Предложен е обемен (масов) метод за определяне скоростта на разпространение на пожар в горска постилка, който представлява оригинално инженерно решение и разширява използваните експериментални подходи при изследване на горските пожари.

3. Установени са зависимости между диелектричните характеристики на горимия материал и вероятността за възникване и развитие на горски пожар, което създава предпоставки за използването им при оценка на пожарната опасност.

4. Демонстрирана е възможността за използване на дистанционни методи, включително SAR технологии, при идентифициране на различни типове горими материали и оценка на риска от възникване на горски пожари.

ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Извършен е статистически анализ на динамиката на възникване на горските пожари в България и са определени индексите на месечна и денонощна сезонност, които представляват полезен инструмент за планиране на превантивните дейности и ресурсното осигуряване на противопожарните служби.

2. Разработена е концепция за многослойна архитектура за реагиране при горски пожари, интегрираща безпилотни летателни системи, LTE мрежи, TETRA комуникации и сателитни канали.

3. Предложено е усъвършенстване на организацията по разследване на причините за възникване на горски пожари в България и за актуализиране на нормативната уредба в тази област.

4. Предложено е използването на дистанционни средства за мониторинг на горски пожари.

5. Предложено е организационно усъвършенстване на взаимодействието между отделните институции, имащи отговорности в процеса на управление на горски пожари в България.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

[1] I. Antonov, S. Antonov, and H. Dochev, „Estimation of Forest Fire Parameters by Joint Use of Geospatial Data and Geodetic Methods“ in Proc. 18th International Conference on ‘Communications, Electromagnetics and Medical Applications’ (CEMA’24), Sofia, Bulgaria, 2024, pp. 50-53., ISSN:1314-2100 SCOPUS Indexing, ID 6B4F77263D276412.

[2]. H. Dochev., A. Tzanova, and D. Spasov, „Thermo-physical characterization of coniferous litter for technical-assisted wildfire early warning – in Proc. 19th International Conference on ‘Communications, Electromagnetics and Medical Applications’ (CEMA’25), Athens, Greece, 2025, pp. 96-98, ISSN:1314-2100 SCOPUS Indexing, ID 6B4F77263D276412.

[3]. H. Dochev, A. Tzanova, and D. Spasov, „Comparative combustion analysis of deciduous forest litter with radar backscatter correlation“ in Proc. 19th International Conference on ‘Communications, Electromagnetics and Medical Applications’ (CEMA’25), Athens, Greece, 2025, pp. 99-101., ISSN:1314-2100 SCOPUS Indexing, ID 6B4F77263D276412.

[4]. H. Dochev, „Integrated communication architecture for forest-fire response in Bulgaria: gap analysis and design blueprint“, in Proc. 19th International Conference on ‘Communications, Electromagnetics and Medical Applications’ (CEMA’25), Athens, Greece, 2025, pp. 102-105, ISSN:1314-2100 SCOPUS Indexing, ID 6B4F77263D276412.

SUMMARY

FOREST FIRE DYNAMICS

MASTER OF ENGINEERING HRISIMIR HRISTOV DOCHEV

CONTENTS.

INTRODUCTION.

CURRENT STATE OF THE PROBLEM.

CHAPTER ONE

**ANALYSIS OF THE FIRE SITUATION IN THE FORESTS OF BULGARIA
AND ASSESSMENT OF THE FIRE MANAGEMENT SYSTEM.**

CHAPTER TWO

**DETERMINING THE INDICES OF MONTHLY AND DAY-NIGHT
SEASONALITY OF FOREST FIRES IN BULGARIA.**

CHAPTER THREE

EXPERIMENTAL PART.

CHAPTER FOUR

**INTEGRATED COMMUNICATION ARCHITECTURE FOR FOREST FIRE
RESPONSE IN BULGARIA.**

CHAPTER FIVE

**ANALYSIS OF THE REGULATIONS REGULATING THE ACTIVITIES OF
PREVENTION AND EXTINGUISHING FOREST FIRES IN BULGARIA.**

SCIENTIFIC AND APPLIED CONTRIBUTIONS.

APPLIED-PRACTICAL CONTRIBUTIONS.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.

BIBLIOGRAPHY.

APPENDIXES

TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA
FACULTY OF POWER ENGINEERING AND POWER
MACHINES
DEPARTMENT OF HYDROAERODYNAMICS AND
HYDRAULIC MACHINES.

M.Sc. Eng. Hrisimir Hristov Dochev

DYNAMICS OF FOREST FIRES)

A U T O A B S T R A C T

of a dissertation submitted for the award of the educational and scientific
degree
"DOCTOR"

Field: 5. Technical Sciences

Professional field: 5.1. Mechanical Engineering

Doctoral Programme "Fluid Mechanics"

PhD Thesis Supervisor: Prof. DSc., Eng. Ivan S. Antonov

SOFIA, 2026

The dissertation has been discussed and referred for defence by the Departmental Council of the Department of Hydroaerodynamics and Hydraulic Machines at the Faculty of Power Engineering and Power Machines of TU-Sofia at a regular meeting held on 02.07.2026.

The public defence of the dissertation will take place on 19.10.2026 at 13:00 in the Conference Hall of the Library and Information Centre of the Technical University of Sofia, at an open session of the scientific jury appointed by Rector's Order No. OJ - 5.1 - 43/14.07.2026 of TU-Sofia, composed as follows:

Internal for TU-Sofia

1. Prof. PhD, Eng. Angel Kostadinov Terziev – professional field 5.1 Mechanical Engineering – Chairman

2. Prof. PhD, Eng. Rositsa Todorova Velichkova - professional field 5.1 Mechanical Engineering

Reserve member: Assoc. Prof. PhD, Eng. Iskra Sashova Simova - professional field 5.1 Mechanical Engineering

External for TU

1. Prof. PhD, Eng. Milcho Stoyanov Angelov – University of Technology - Plovdiv - professional field 5.1 Mechanical Engineering

2. Assoc. Prof. PhD, Eng. Ivan Todorov Todorov – Academy of the Ministry of Interior - PF 5.7 Architecture, Construction and Geodesy

3. Assoc. Prof. PhD, Eng. Hristo Kostadinov Prodanov - Academy of the Ministry of Interior - PF 5.7 Architecture, Construction and Geodesy

Reserve member: Assoc. Prof. PhD, Eng. Penka Nelieva Zlateva – Technical University of Varna - PF. 5.4. Energy

Reviewers:

1. Prof. PhD, Eng. Milcho Stoyanov Angelov – University of Technology-Plovdiv - PF 5.1 Mechanical Engineering

2. Assoc. Prof. PhD, Eng. Ivan Todorov Todorov – Academy of the Ministry of Interior – PF 5.7 Architecture, Construction and Geodesy

Materials relating to the defence are available to interested parties at the office of the Faculty of Power Engineering and Power Machines of TU-Sofia, Building No. 2, Room No. 2344.

The doctoral candidate is a part-time PhD student at the Department of Hydroaerodynamics and Hydraulic Machines of the Faculty of Power Engineering and Power Machines. The research presented in the dissertation was carried out by the author, and some of it was supported by scientific research projects.

Author: M.Sc. Eng. Hrisimir Dochev

Title: Dynamics of Forest Fires

Print run: 30 copies

Printed at the University Publishing House of the Technical University of Sofia

I. GENERAL CHARACTERISTICS OF THE DISSERTATION

Relevance of the problem

The relevance of the research is determined by the exceptionally great danger that forest fires pose to Bulgaria during the last several decades of the 20th century and at the beginning of the 21st century. The severe fire situation developing in Bulgaria's forest areas indicates the existence of serious problems both in forest fire prevention and in the organisation of fire suppression.

The conclusion emerges that, within the last decade of the 20th century and the first decades of the 21st century, Bulgaria has transformed from a country with a comparatively low forest fire risk into a country where the problem of forest fires has not only emerged but has grown so serious that it requires the search for and application of an entirely new approach to prevention and combating forest fires. Moreover, Bulgaria needs to apply forest fire protection practices comparable to those of the leading European and other countries in this field.

Objective of the dissertation, main tasks and research methods

The objective of the dissertation is to carry out a comprehensive study and analysis of the current fire situation in Bulgaria's forests and of the forest fire management system, including its two main components: prevention and suppression.

In fulfilment of this objective, the following main tasks have been formulated:

1. Through laboratory research, to determine the ignition and combustion behaviour of coniferous and broadleaved forest litter;
2. Following analysis of the results of the experiment conducted, to propose a volumetric (mass-based) experimental method for determining the linear rate of spread of forest fires in different types of forest litter;
3. To analyse the fire situation in Bulgaria's forests at the end of the 20th century and the beginning of the 21st century and to assess the condition and effectiveness of the prevention and response system upon the occurrence of forest fires;
4. To analyse the regulatory framework governing forest fire prevention and suppression in Bulgaria and to propose measures for its improvement.

An interdisciplinary approach has been applied to achieve the objective set for the dissertation, given that the dynamics of forest fires represent a complex multifactorial process whose investigation requires the application of different scientific methods.

A comprehensive research methodology has been used for the successful solution of the tasks set in the dissertation, combining methods of statistical analysis, assessment and forecasting, experimental research,

mathematical processing of the results obtained, engineering modelling and regulatory analysis.

Scientific novelty

The research conducted aims to study and model fire behaviour in homogeneous and heterogeneous forest fuel layers comprising dead forest litter, and by their nature they are original for Bulgaria.

The proposed volumetric (mass-based) method for determining the rate of fire spread in different types of forest litter represents an original solution and extends the existing experimental approaches for analysing combustion processes.

Practical applicability

As an essential practical result of the research conducted, through application of the developed mass (volumetric) method, the experimental determination of the linear rates of combustion of broadleaved and coniferous forest litter may be cited.

An additional practical contribution consists of the quantitative relationships derived between the linear rate of combustion of coniferous and broadleaved forest litter and their moisture content and initial temperature. The data obtained can find practical application in assessing fire risk in forest areas through the use of available meteorological data.

A valuable practical result of the dissertation is the determination of the indices of monthly and diurnal seasonality of forest fires occurring in Bulgaria. Through them, the probability of forest fire occurrence during different periods of the year and hourly intervals of the day is characterised quantitatively. The results obtained have considerable practical value for planning preventive measures and resource provision for fire protection services.

Validation and dissemination

The results of the research conducted were presented at the 18th International Conference on 'Communications, Electromagnetics and Medical Applications' (CEMA'24), and the 19th International Conference on 'Communications, Electromagnetics and Medical Applications' (CEMA'25).

Using the data obtained experimentally, practical relationships for the linear rate of combustion of coniferous and broadleaved forest litter as functions of their moisture content and initial temperature have been determined.

The performance of the proposed multilayer communication architecture has been validated through a detailed network simulation using NS-3

(Network Simulator 3), a discrete-event simulator. The simulation was configured with a high-quality digital terrain model of the Rila mountain range in Bulgaria and was carried out under a defined operational scenario intended to test the system under real loading and environmental conditions.

Publications

The main achievements and results of the dissertation have been published in 4 scientific papers, of which 1 is a sole-authored paper.

All publications on the topic of the doctoral dissertation were presented at international scientific forums – the 18th and 19th International Conference on ‘Communications, Electromagnetics and Medical Applications’ (CEMA’24) and (CEMA’25) – and are indexed in Scopus.

Structure and volume of the dissertation

The dissertation comprises 225 pages and includes an introduction, five chapters addressing the formulated main tasks, a list of the main contributions, a list of publications arising from the dissertation and references. A total of 124 literature sources are cited, of which 22 are in Latin script and 81 in Cyrillic, while the remainder are internet addresses. The work includes a total of 41 figures in the main body and 120 figures in the appendices, and 18 tables. The numbers of figures and tables in the auto-abstract correspond to those in the dissertation.

CONTENTS OF THE DISSERTATION

INTRODUCTION.

Bulgaria's forests are part of the European and global forest heritage. They have global and national ecological, economic, social and cultural significance.

Our country is characterised by great diversity of plant and animal communities, with almost all major types of habitats and biotopes known in Europe occurring on its territory. Some very rare endemic species characteristic only of our geographical latitudes are also found. This is determined by Bulgaria's geographical location between three zones at the border of the Old Continent and Central Asia.

The lands and forests of Bulgaria's forest fund preserve more than 80% of the country's protected plant species and more than 60% of its animal species threatened with extinction. To conserve this diversity, 3 national parks, 10 nature parks, 55 reserves and 35 managed reserves have been designated on the country's territory.

Alongside problems related to intensive forest use, Bulgaria's plant and biological diversity also faces a new challenge – forest fires.

CURRENT STATE OF THE PROBLEM

As of 31.12.2024, the total area of forests and forest lands in Bulgaria is 4,283,668 ha, of which afforested area (including dwarf pine) – 3,939,110 hectares. [2]. The area of forest lands is 3,952,622 ha (92.27% of the total), and the area of agricultural lands possessing the characteristics of forest within the meaning of Art. 2 of the Forests Act ("forests on agricultural lands") is 331,046 ha (7.73% of the total area).

Bulgaria's forests and the flora and fauna within them are of exceptional importance for our country.

Natural vegetation is a major factor in shaping the natural environment and maintaining its equilibrium. Different types of vegetation have great climatic, water-regulating and soil-protective significance, and the function of forest vegetation is essential.

According to the literature [4], until two or three decades ago, forests were considered mainly for their economic significance as a source of timber, pasture, game and certain other ancillary activities. Their role as a decisive ecological factor, their cultural-historical, recreational and other values were neglected. Only at the end of the 19th and the beginning of the 20th century did attention begin to be paid in our country also to the anti-erosion significance of forests.

Forest stands play a significant role in reducing greenhouse gas emissions into the atmosphere by binding carbon in accumulated biomass

and effectively absorbing CO₂. Bulgarian forests provide approximately 85% of the country's water runoff, or about 3.6 billion m³ of clean drinking water resources.

Every year, as a result of fires occurring in Bulgaria, thousands of hectares of forest stands are destroyed, causing enormous economic losses. The damage inflicted on flora and fauna and on ecological equilibrium is immeasurable. Large quantities of harmful substances are released into the atmosphere, the water balance is disturbed, fine soil particles are blown away and conditions are created for erosion of land areas. [22]

As a result of forest fires, valuable and rare plant and animal species are destroyed, whose restoration subsequently requires decades or more, and in some cases rehabilitation of the destroyed ecosystems is not possible at all.

Human casualties caused by forest fires or sustained in combating them should also not be overlooked. Damage to specialised equipment used to suppress forest fire disasters often reaches considerable proportions.

Statistical data for Bulgaria show that until the end of the 1980s, the main indicators characterising the dynamics of forest fires occurring had relatively constant values – on average, (800–3000) ha of forest were burned annually.

The last decade of the past century and the early years of the 21st century are characterised by a drastic change and complication of the fire situation in Bulgaria's forests. The number of forest fires occurring increased more than sixfold, and the average annual area burned with forest stands reached 112,000 ha. The problem of forest fires acquired a crisis character, and for 1999–2001 the situation may be described as catastrophic. In 2000, characterised by the most severe fire situation, more than 40,000 ha of forest stands were destroyed [25], [26], [27].

A similar trend was observed in 2006 and 2007, with an average of 95,000 ha of forest stands destroyed annually.

The devastating forest fires occurring in Bulgaria affected territories not previously seen and destroyed vast areas of forest stands. What had been created over decades and centuries was completely destroyed by the fire disaster.

CHAPTER ONE

ANALYSIS OF THE FIRE SITUATION IN BULGARIA'S FORESTS AND ASSESSMENT OF THE FIRE MANAGEMENT SYSTEM

The objective of the research in Chapter One is to analyse the fire situation in the forest fund of the Republic of Bulgaria using the information available in the database of the General Directorate "Fire Safety and Protection of the Population" – Ministry of Interior [22], [23].

The main task is to trace the dynamics and numerical indicators of the fire situation in Bulgaria's forests at the end of the 19th and the beginning of the 20th century using data that form part of the official database of the Automated Information System (AIS Database) "Incidents" of the General Directorate "Fire Safety and Protection of the Population" – Ministry of Interior [22].

On the basis of the analysis carried out, adequate measures are to be identified for improving prevention of the fire situation in Bulgaria's forests.

All calculations, results and comparisons of indicators related to the fire situation in the forest sector and concerning forest areas have been aligned with the data presented in the Annual Report of the Executive Forest Agency for 2023 [31].

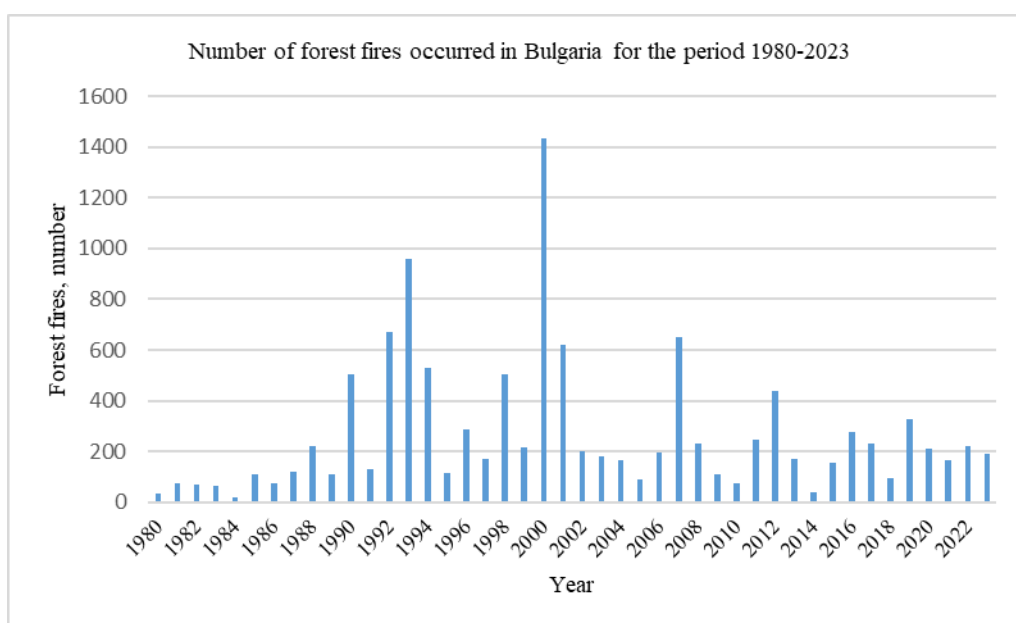


Figure 1.1.2 Distribution by year of the number of forest fires occurring in Bulgaria during the period 1980–2023.

On the basis of the analysis carried out, the following main conclusions may be drawn:

1. The fewest forest fires during the 44-year study period occurred in 1984 – 21 cases, which is 12.66 times less than the annual average for the entire 44-year period.

2. The greatest number of forest fires during the 44-year study period occurred in 2000 – 1,436 cases, which is 5.40 times more than the annual average for the entire 44-year period;

3. The causes of forest fires are of different nature, but they are mainly related to human activity, with more than 30% of undetermined origin. This leads to the conclusion that the process of investigating forest fires in Bulgaria is not a priority and is often neglected

4. Regardless of the differing dynamics in individual years and despite the measures taken, the annual average number of fires after 2000 shows a persistently increasing trend.

CHAPTER TWO

DETERMINATION OF THE INDICES OF MONTHLY AND DIURNAL SEASONALITY OF FOREST FIRES IN BULGARIA

In Chapter Two, an analysis and assessment of the monthly and diurnal seasonality of forest fire occurrence on the territory of the Republic of Bulgaria has been carried out. For this purpose, statistical data for a past 43-year period were used to determine monthly seasonality and a 26-year period, respectively, for diurnal seasonality [22].

Using an appropriate mathematical method, processing and analysis of the available statistical data on forest fires occurring on the territory of the Republic of Bulgaria were carried out.

The analysis carried out allows the results obtained to be used for undertaking appropriate preventive measures and planning specific management decisions for combating forest fires in Bulgaria.

The indices of monthly seasonal fluctuations I_s have been calculated and are presented graphically in Fig. 2.1.12

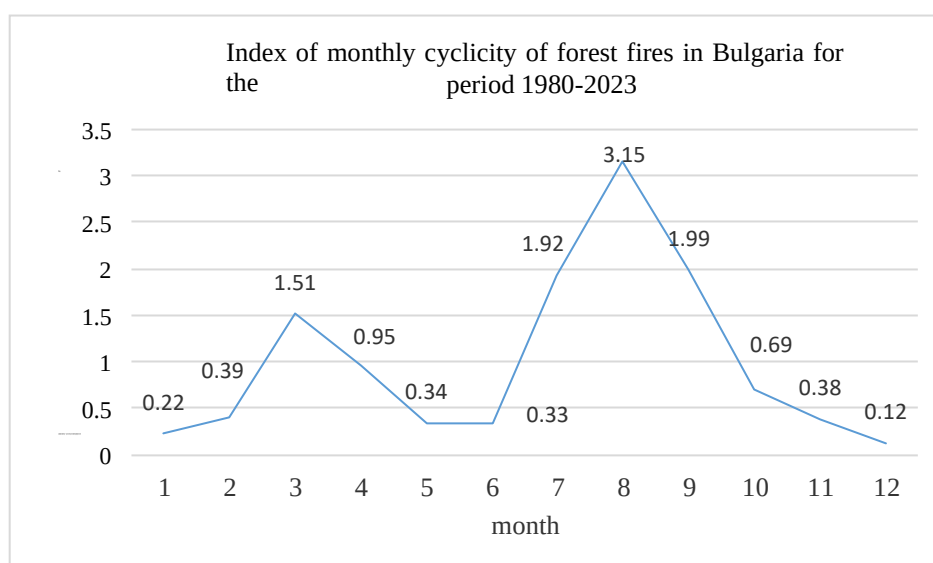


Fig. 2.1.2. Seasonality index of forest fire occurrence in Bulgaria during the period 1980–2023.

A pronounced monthly cyclicality in forest fire occurrence in Bulgaria has been established, characterised by two main peaks, the first and largest in August, and the second in March of the calendar year.

The diurnal indices of seasonal fluctuations I_s have been calculated and are presented graphically in Fig. 2.3.8.

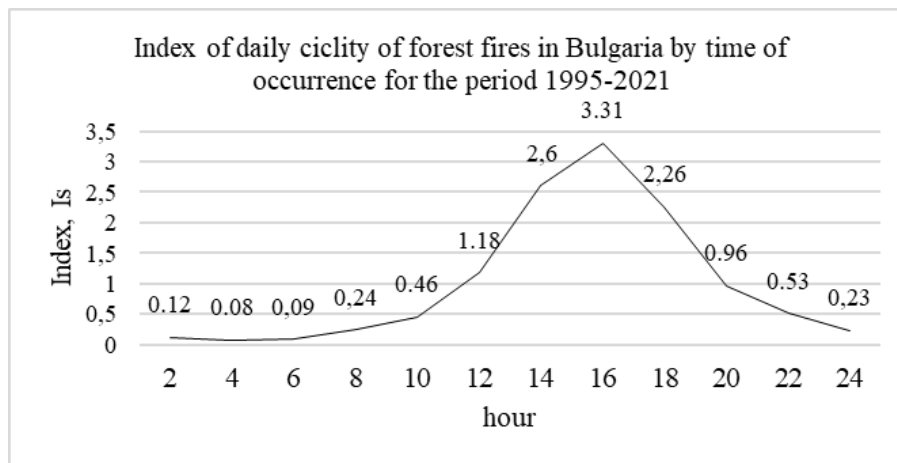


Fig. 2.2.7. Diurnal cyclicity index of forest fires in Bulgaria by hour of occurrence for the period 1995–2021.

Diurnal cyclicity of forest fire occurrence in Bulgaria has been established, with 16:00 hours of the day determined as the most probable hour of occurrence

On the basis of the results of the analyses carried out in Section 2.1 and Section 2.2 of Chapter Two, the main conclusion that may be emphasised is that the greatest probability of forest fire occurrence in Bulgaria exists in August of the calendar year and at 16:00 hours of the day.

CHAPTER THREE

EXPERIMENTAL PART

3.1. Research methodology. Experimental equipment.

Forest and field fires are characterised primarily by the combustion of flammable materials of plant origin. This concept should be generalised as combustion of forest litter, herbaceous vegetation and shrubs, and in crown fires also trees. Environmental conditions, landscape and air parameters – wind speed and direction, temperature and humidity – exert a significant influence on the development of the process.

One of the objectives of the present research is to describe the model covering the problem of combustion of homogeneous and heterogeneous layers of natural flammable materials and the development of the convective flow arising above them. The layers consist of dead forest litter.

While large-scale monitoring relies on satellite imagery and meteorological data, ignition and initial spread of a forest fire are governed by processes occurring at microscale within the fuel layer of forest litter. The composition and condition of this layer, consisting mainly of forest detritus, are critical factors determining overall fire risk [69].

In the field of forest management in Bulgaria, the term "Dead forest litter" has been adopted, for which a specific definition is given in [37],

namely: "Dead forest litter is a supra-soil organic layer formed from fallen woody and other plant material".

The accuracy of forest fire risk assessment and fire behaviour modelling is critically dependent on precise characterisation of the forest fuel layers comprising dead forest litter.

In temperate mixed forests, dead forest litter is often a complex mosaic of fuel types composed mainly of debris from both broadleaved and coniferous tree species. These types of debris possess different physical and chemical properties – such as packing ratio, surface-to-volume ratio and chemical composition – which significantly influence their combustion dynamics and overall flammability

Despite these differences, modern large-scale fuel hazard models often simplify this complexity by treating mixed debris as a single homogeneous mass. This generalisation can lead to significant inaccuracies in forecasting fire spread and intensity. A key challenge is the lack of effective techniques for remote sensing capable of distinguishing these fuel types at ground level, especially beneath a dense forest canopy. While optical and infrared methods have limitations due to attenuation (shading) by the canopy, the use of low-frequency radar, which has better penetration capabilities, remains to a large extent an unexplored path for this specific application.

The other main objective of the present research is to propose a new approach for remote classification of fuel types by correlating their combustion behaviour with their UHF radar backscatter signatures. It is assumed that the structural differences between broadleaved and coniferous forest litter lead to different moisture evaporation dynamics during the initial phase of fire development.

The task is to investigate this hypothesis experimentally. For this purpose, a comparative analysis will be carried out of combustion dynamics and simultaneous measurements of UHF radar backscatter for both broadleaved and coniferous dead forest litter under controlled laboratory conditions.

As the ultimate practical objective of the experiment, it is to be determined whether a unique radar signature exists that can be used for reliable discrimination of these fuel types, thereby providing a new method for creating more accurate high-resolution fuel maps to improve fire hazard models.

Samples of broadleaved dead forest litter composed mainly of leaves from *Quercus robur* (pedunculate oak) and *Fagus sylvatica* (European beech) were collected from a temperate mixed forest.

After conditioning in a humidity-controlled chamber, a basic thermophysical characterisation of the broadleaved forest litter was carried out to establish its main properties. The results, summarised in Table 3.1.1, show a high fuel potential, with volatile solids comprising more than 90% of total dry matter even at different moisture levels.

Table 3.1.1 Basic properties of broadleaved forest litter

Sample	Moisture content (%)	Volatile solids (% of TS)
1.	10.4	92.1
2.	17.7	90.7

For comparison, samples of coniferous dead forest litter dominated by *Pinus* sp. [70] and *Pinus sylvestris* were also prepared.

The collected material consists of a heterogeneous mixture of needles, small twigs and bark fragments. Before combustion and dielectric analysis, an analysis of the basic fuel characteristics was carried out to establish its main properties. The results of this initial analysis are summarised in Table 3.1.2. It was established that the forest litter possesses acidic properties (pH 4.2), with a high proportion of combustible organic material, indicating considerable fuel potential.

Table 3.1.2. Basic thermophysical properties of coniferous forest litter

Parameter	Value
Moisture content (field, %)	13.3 ± 0.8
pH	4.2
Volatile solids (% of total solids)	67.1 ± 1.2
Ash content (% of total solids)	32.9 ± 1.2

Coniferous forest litter, in particular, represents a readily ignitable fuel source due to its chemical composition and physical structure. Its thermophysical properties – such as moisture content, bulk density and volatile solids content – directly influence its ignitability and combustion behaviour. Traditional early warning systems, however, often lack sufficient accuracy to monitor these key fuel-level parameters in real time. This creates a critical gap in detection capability, as significant changes in fire risk at ground level can occur rapidly, long before they are detected by remote sensing methods.

To overcome this gap, a new approach is needed that directly links the fundamental fuel properties with a technical monitoring solution.

The objective of the experiment conducted is twofold: first, to carry out a detailed thermophysical characterisation of coniferous forest litter in order to quantify its combustion behaviour; and second, to demonstrate how these properties can be correlated with parameters measured by low-power sensor nodes. More specifically, the relationship between the dielectric properties of the fuel and its time to ignition, observed through thermocouple arrays and thermographic imaging [71], was investigated. The ultimate goal is to create a scientifically grounded basis for a new generation of in-situ, technically assisted early warning systems, capable of

providing timely and accurate warnings based on the actual condition of the fuel layer in the forest.

Detailed information on sampling locations and sampling methods is given in Appendix III.

Combustion tests in the experiment conducted were carried out in a specially constructed calorimetric cube with a side length of 21 cm (calorimeter), which provides a controlled heating environment and allows measurement of the rate of heat release.

A schematic representation of the calorimeter is given in Figure 3.1.1.

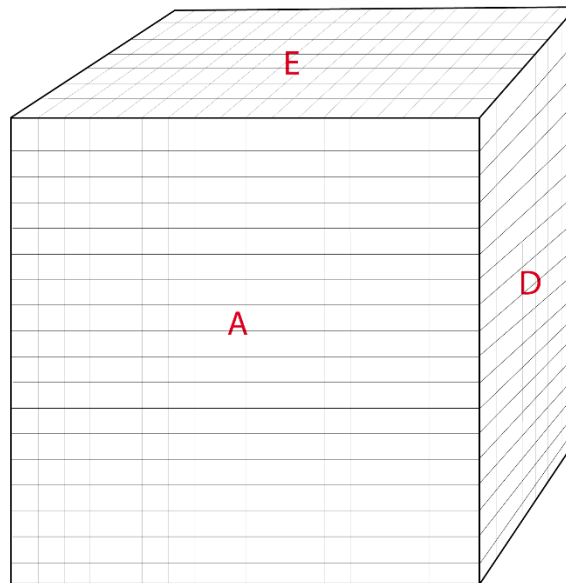


Figure 3.1.1. Schematic of the test calorimeter

To monitor temperature development during the experiments, the setup was equipped with an array of 16 thermoelectric transducers (thermocouples) of type K. They were strategically positioned to record temperatures on the surface walls, within the volume of the fuel sample and in the ambient environment.

A schematic representation of the conventional designation of the calorimeter walls and the arrangement of the thermocouples is given in Figure 5.2.

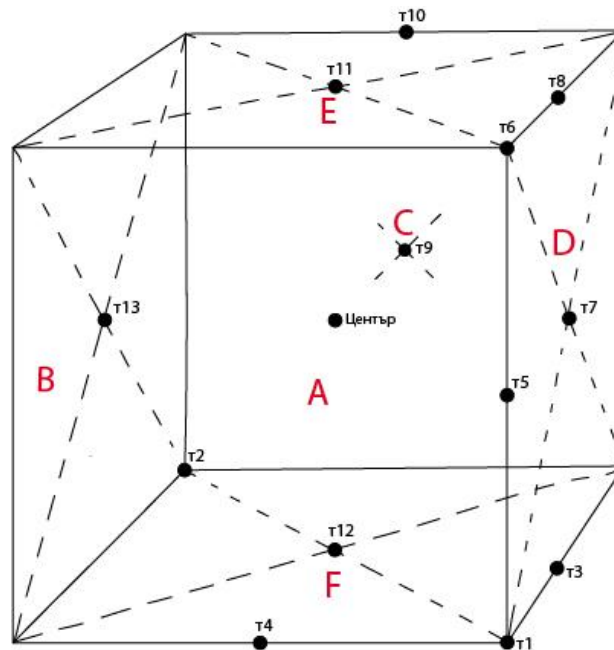


Figure 3.1.2. Conventional designation of the walls of the experimental calorimeter and arrangement of the recording thermocouples.

For the purposes of the experiment conducted, a test rig was constructed, which is shown in Figure 3.1.4.



Figure 3.1.4. Test rig – frontal view.

In addition to contact measurements with thermocouples, two non-contact methods were used.

First, the entire combustion process was observed using a thermal imaging camera (thermography) in the manner initially described in [72]. For visual observation and spatial temperature analysis a FLIR E40 thermal

imaging camera with a clear view of the sample surface was positioned. Thermographic data were used for visual confirmation of the exact moment of ignition and for observation of flame front propagation through the fuel layer

This allowed precise spatial identification of the ignition point and real-time tracking of flame front propagation across the sample surface (Fig. 3.1.5).

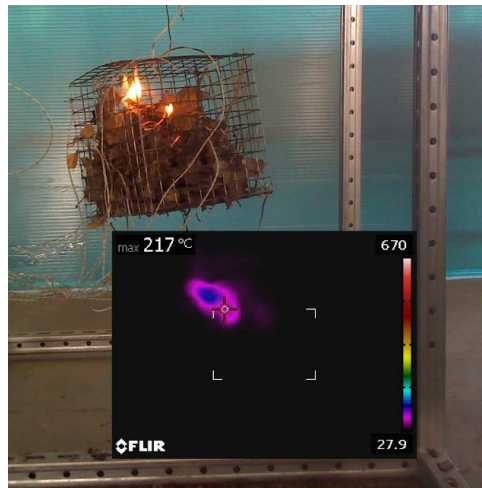


Figure 3.1.5. Propagation of the flame front across the sample surface and thermographic image

Second, an open-ended coaxial probe operating at 10 GHz was embedded in the forest litter sample to continuously measure its complex dielectric permittivity (ϵ^*) [73].

To measure backscatter from the sample during the heating and combustion process, a continuous-wave (CW) radar system operating at 450 MHz was used. The system was configured to record the intensity (in dB) of the backscattered signal over time. A key aspect of the experimental design is synchronisation of all data streams.

Data from the thermocouples, the FLIR E40 thermal camera and the UHF radar system are recorded every 10 seconds by a central data acquisition unit that logs the time of each measurement.

For the purposes of the experiment, measuring instruments of approved type for use on the territory of the Republic of Bulgaria were used. These had valid calibration status at the time the experiment was conducted.

Information on the parameters of the measuring instruments used is contained in Table 3.1.1.

Table 3.1.1. Parameters of the measuring instruments used.

No.	Name, type, identification number	Measuring range, accuracy	Measurement uncertainty
1.	Digital thermo-hygrometer 608-H1, No. 34817326	5,0°C 20,0°C	[5±0,15]°C [20±0,14]°C

No.	Name, type, identification number	Measuring range, accuracy	Measurement uncertainty
		40,0°C 30% 80%	[40±0,14]°C [30±1,3] %rh [80±1,4] %rh
2	Digital thermo-hygrometer "Testo" 610, ser. No. 39273594/809.	5,0°C 20,0°C 40,0°C 30% 80%	[5±0,15]°C [20±0,12]°C [40±0,15]°C [30±1,2] %rh [80±1,3] %rh
3.	Air velocity meter P655-LOG	[0,15-20,0]m/s	[0,2±0,1]m/s [3,0±0,12]m/s [5,2±0,15]m/s
4.	Barometer "Testo 511", serial number 39112763/603	[300 – 1200]hPa; Accuracy: ± 3.0 % Resolution: 0.1 hPa;	[500±3]hPa
5.	Comeco TC800 – multi-point control indicator	[0...1600] °C Temperature drift – 0.005% of range per 1 °C Cold junction compensation ± 1 °C, automatic software	0.4% of range
6.	ST thermocouple	[-150 – 1600]°C	3.0% of range

Combustion was initiated using a calibrated heat source to ensure repeatability. During the preheating and combustion phases, data from the thermocouples, thermal camera and dielectric probe were continuously recorded. "Time to ignition" was defined as the time elapsed from activation of the ignition source and its application to the forest litter until the first visible sign of sustained flaming, confirmed by thermographic imaging data.

3.2. Visual investigation of combustion development in homogeneous forest litter.

Date of the experiment – 29 July 2023.

Location – village of Kostenets, F-plus laboratory complex.

Experimental conditions:

- atmospheric pressure $P = 936.2 \text{ hPa}$;
- ambient temperature $T_{\text{amb}} = 26.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- air humidity $RH_{\text{air}} = 38.2 \%$

For each experimental run, a sample of defined mass was prepared by weighing a specified quantity of conditioned broadleaved and coniferous forest litter

A total of eight runs were carried out in the laboratory experiment conducted. The first four are described in the main body of the dissertation, and the remainder in Appendix V.

3.2.1. First run.



Run 1 – preparation and filling of the calorimeter with forest litter.

60 g of oak forest litter were weighed and then placed in the experimental calorimeter prepared for this purpose.



Run 1 – “ignition” phase. Carried out from the top of the calorimeter, at wall “C” of the calorimeter.



Run 1 – maximum combustion phase.



Run 1 – smouldering combustion phase.

Figures 3.2.1.1 and 3.2.1.2 present the graphs of the measured temperatures from each thermocouple and the graphs of the minimum, mean and maximum temperatures recorded during the run.

Graphs of the temperatures recorded by the thermocouples positioned on the individual walls of the experimental calorimeter are given in Appendix 4.

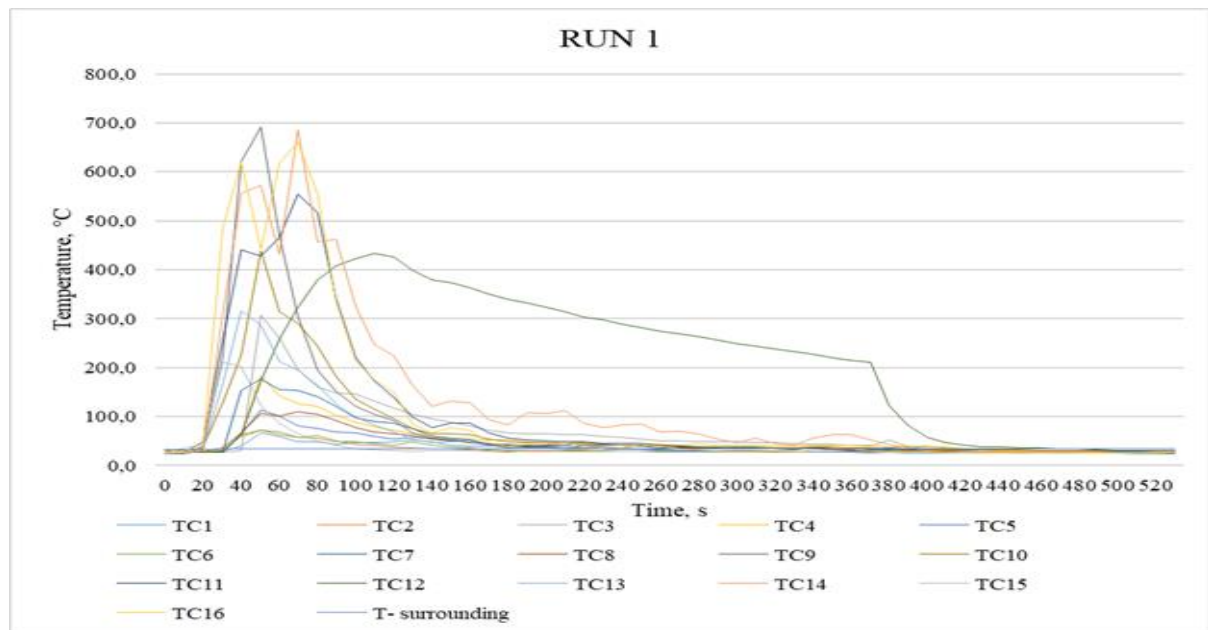


Figure 3.2.1.1. Graphical presentation of the temperatures recorded by 16 thermocouples measured during the first run

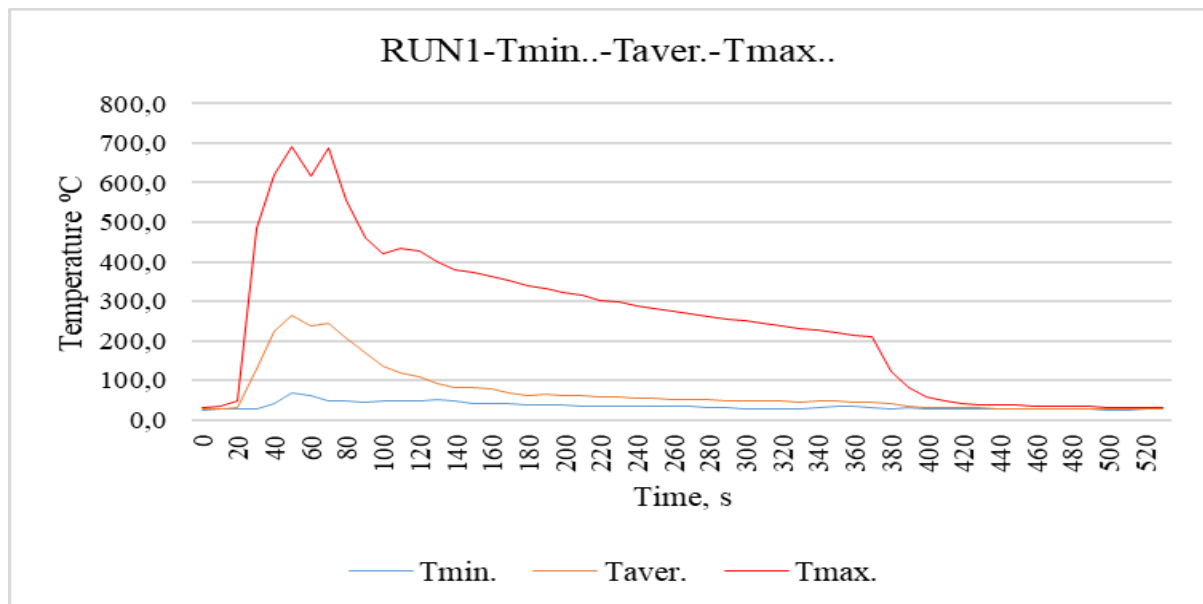


Figure 3.1.2 Graphical presentation of the recorded minimum, mean and maximum temperatures measured during the first run.

3.3 .Volumetric (mass-based) method for determining the rate of fire spread in forest litter

The rate of fire spread in forest litter is an important parameter of a forest fire. In most cases, it is a determining factor in fire development, the tactics adopted for its suppression and the extent of damage caused. For these reasons, study of the phenomenon of "rate of combustion spread in forest litter" is extremely important for successful combating of forest fires not only from a theoretical but also from a purely practical standpoint.

Under laboratory conditions, the rate of fire spread under accepted flaming combustion can be determined as:

- time of passage between two thermocouples on the test specimen,
- or
- by determining the rate of burnout of the materials filling the test calorimeter.

Since the second method is more accurate, the experimental investigation was carried out using it.

The total mass (volumetric) burnout rate is determined from the time of complete burnout (flaming combustion and smouldering) – tfb.

$$u_m = \frac{m}{t_{fb}} \quad (3.3.1)$$

where: $m = \rho \cdot W_k$ – the product of the litter mixture density and the volume of the experimental calorimeter.

From (3.3.1), the linear rate of fire spread across the forest litter is calculated as:

$$u_\ell = \frac{u_m}{\rho \cdot B} \quad (3.3.2)$$

Where: A is the cross-sectional area of the test specimen.

The experimental investigations were carried out with beds of coniferous and broadleaved forest litter under the following conditions:

- density of the test specimen – $\rho = 6.478 \text{ kg/m}^3$;
- moisture content:
 - a) broadleaved litter – $(13.3 \pm 0.8)\%$;
 - b) for coniferous litter – $(10.4 \div 17.7)\%$.

The duration of combustion for broadleaved litter is $\tau_c = 109 \text{ s}$ and the rate of combustion $u_l = 1.93 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} = 1.92 \text{ mm/s}$.

The duration of combustion for coniferous litter is $\tau_c = 92 \text{ s}$ and the rate of combustion $u_l = 2.28 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} = 2.28 \text{ mm/s}$.

According to the literature [86], [87], combustion rates of $u_l = 3.3 \text{ mm/s}$ are given, which represents a slight overestimate compared with the investigations conducted. It should be emphasised that the initial conditions of the cited experiments are not precisely described.

An experiment was also conducted on combustion of high-density forest litter – a multi-year layer.

For broadleaved forest litter at $\rho = 32.07 \text{ kg/m}^3$, the described methodology yields a linear rate of fire spread $u_l = 1.166 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} = 1.166 \text{ mm/s}$.

For coniferous litter at $\rho = 55.83 \text{ kg/m}^3$, $u_l = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} = 1 \text{ mm/s}$.

3.4 Factors influencing the process of combustion spread in forest litter.

- According to the literature [86], [87], the factors influencing the process of combustion spread in forest litter may be grouped into two main categories:
- environmental parameters where the combustion process occurs;
- parameters of the flammable material involved in the combustion process.

It is known that environmental parameters such as wind, terrain characteristics and relative air humidity [86], [87] exert a substantial influence on the combustion process in forests.

The following relationship for the dependence of combustion rate u derived [86], [87]:

$$u_l = \frac{u_0}{1 + 7,8 \frac{W}{1 + W}} \quad (3.4.1)$$

where:

u_l – linear rate of combustion.

u_0 – rate of combustion of forest litter at $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

W – moisture content of forest litter at initial temperature.

Applying formula 3.4.1, the variation in combustion rate as a function of moisture content for coniferous and broadleaved forest litter was determined using the experimentally established values of $u_0 = 2.28$ mm/s for broadleaved and $u_0 = 1.92$ mm/s for coniferous forest litter.

The results are presented graphically in Figures 3.4.1 to 3.4.5.

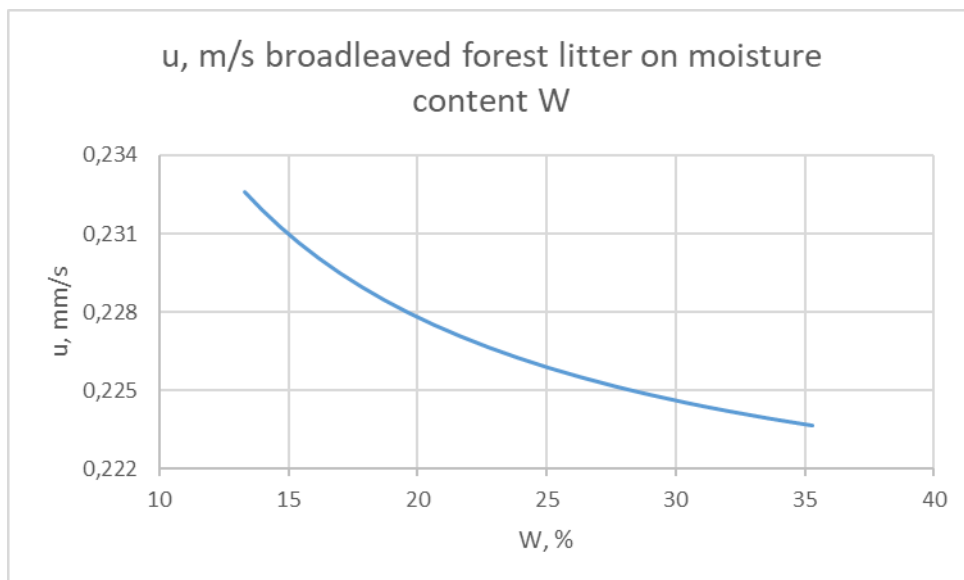
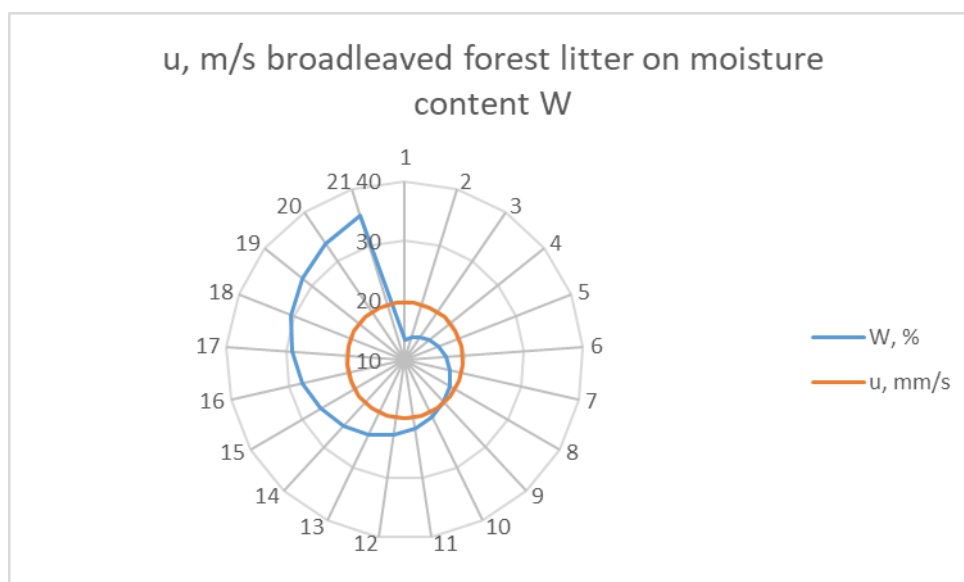


Fig. 3.4.1 Dependence of the combustion rate of broadleaved forest litter on moisture content



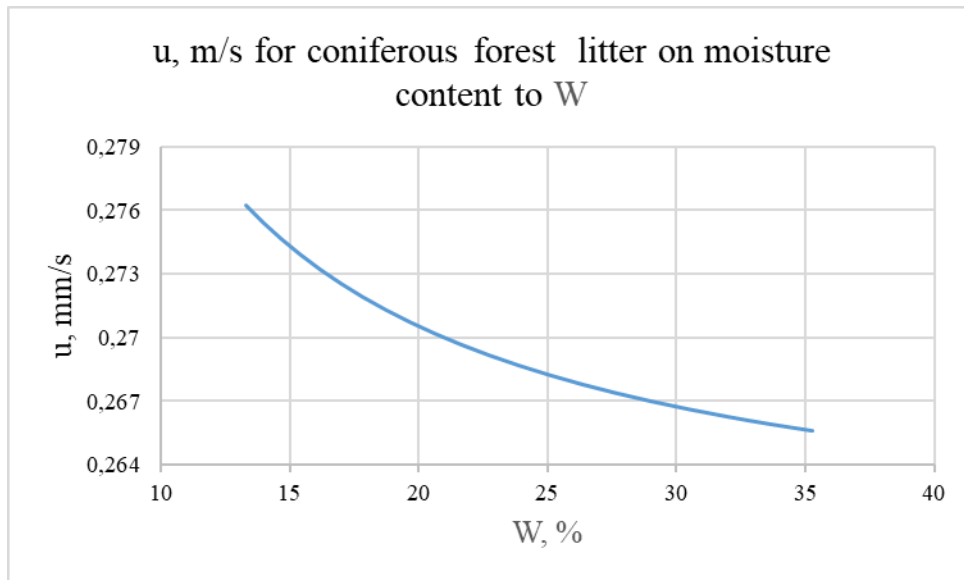


Fig. 3.4.4 Dependence of the combustion rate of coniferous forest litter on moisture content

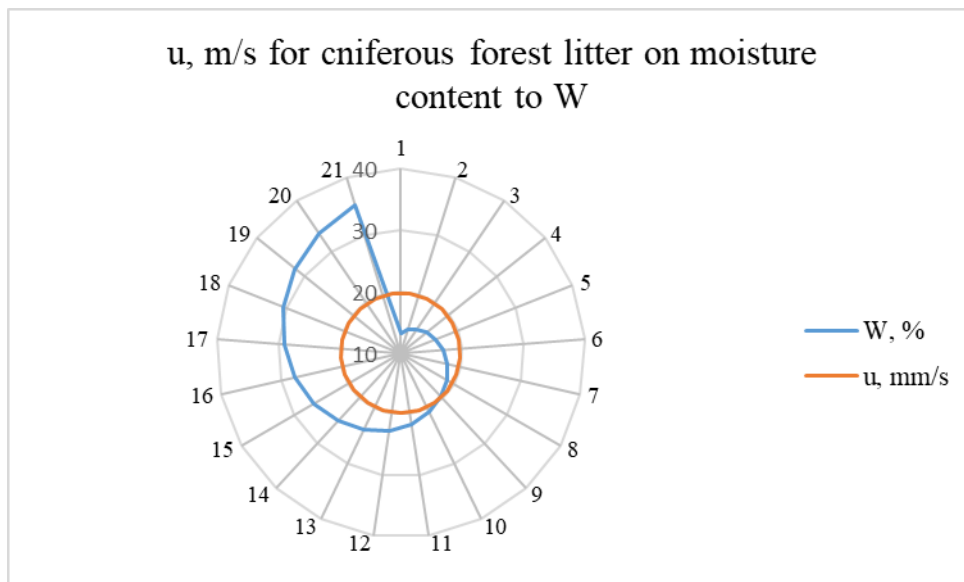


Fig. 3.4.5 Dependence of the combustion rate of coniferous forest litter on moisture content

According to the literature [86], [87], in investigations conducted to determine the combustion rate of forest litter at different initial heating temperatures, the following relationship was derived:

$$u_{\ell} = u_0 e^{-0.006T_0}$$

u_{ℓ} – linear rate of combustion.

u_0 – rate of combustion of forest litter at $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$.

T_0 – initial temperature.

Applying formula 3.4.2, the variation in combustion rate at different temperatures for coniferous and broadleaved forest litter was determined using the values established in the experiment of $u_0 = 2.28$ mm/s for broadleaved and $u_0 = 1.92$ mm/s for coniferous forest litter.

The results are presented graphically in Figures 3.4.7 and 3.4.8.

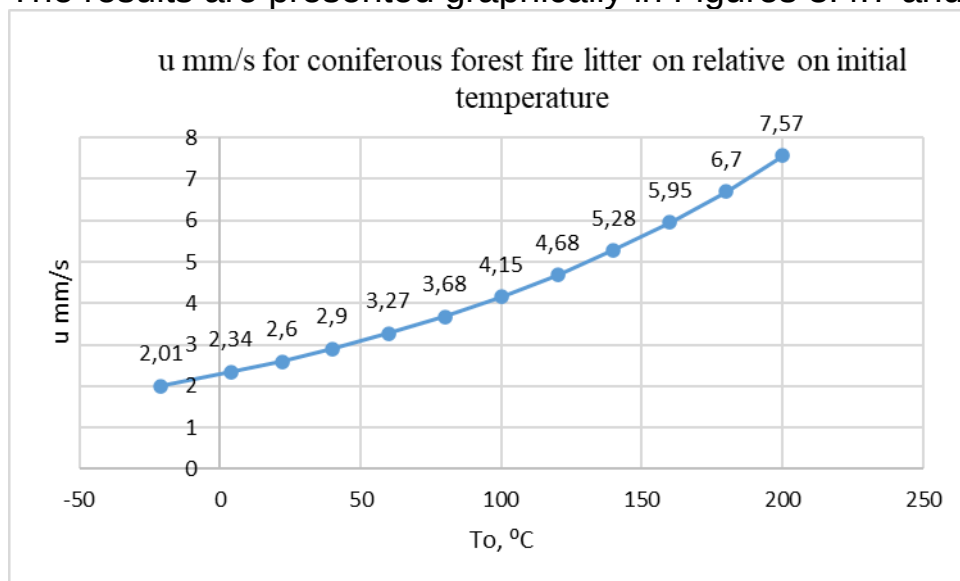


Fig. 3.4.7. Dependence of the combustion rate of coniferous forest litter on initial temperature

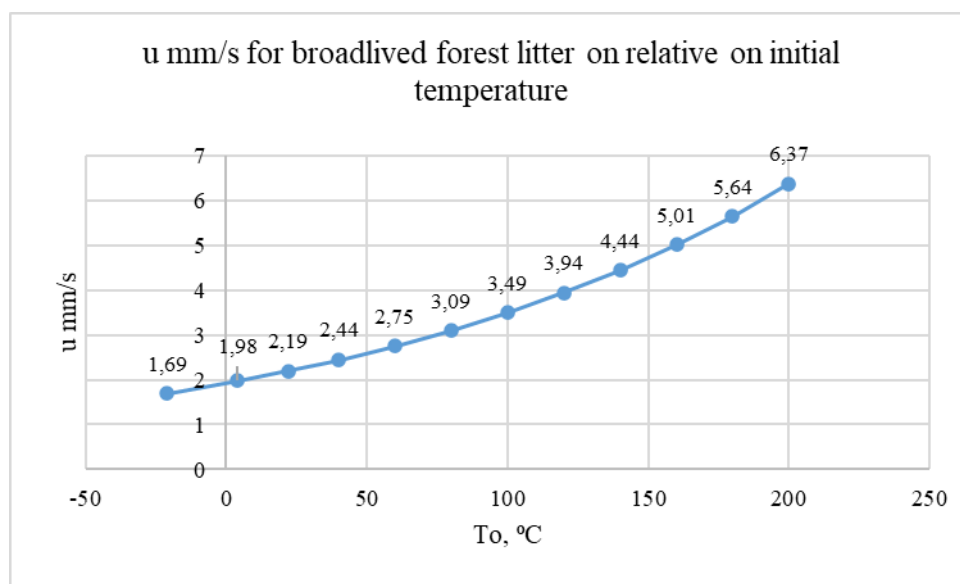


Fig. 3.4.8. Dependence of the combustion rate of broadleaved forest litter on initial temperature

3.5. CONCLUSIONS

The following conclusions follow from the experimental investigations and analyses conducted:

3.5.1. Fire spread in forest litter depends on its type and degree of moisture.

3.5.2. Broadleaved forest litter yields a lower rate of fire advance compared with coniferous litter, which is due to its structure and calorific value as a fuel material.

3.5.3. In well-compacted multi-year litter beds, fire spreads more slowly, especially in coniferous litter, and dies out within the depth of the layer.

3.5.4. Atmospheric and natural factors are those that most noticeably influence the process of fire advance up to its acceleration. It should be borne in mind that the experimental investigations were conducted under laboratory conditions with stationary air flows.

CHAPTER FOUR

INTEGRATED COMMUNICATION ARCHITECTURE FOR FOREST FIRE RESPONSE IN BULGARIA

The proposed architecture is designed to overcome the established gaps in existing coordination systems between services responsible for forest fire response, achieving three main objectives.

First, it aims to reduce the average incident response time to under 15 minutes, ensuring that critical data reach front-line units quickly.

Second, it is designed to achieve link availability above 99.5%, providing a resilient and reliable network even under adverse conditions.

Finally, the architecture is intended to provide a common operational picture, enabling real-time video streaming and other sensor data from the incident site to command posts [90].

The architecture integrates three separate but interconnected communication layers to achieve these objectives:

- Layer 1: TETRA ground nodes (voice and low-speed data): The foundation of the architecture is a network of terrestrial trunked radio (TETRA) ground stations. This layer provides a resilient, secure and, most importantly, operationally compatible push-to-talk voice communication network for all responding institutions, eliminating problems with incompatible legacy radio systems.

- Layer 2: UAV-LTE relays (frontline data network): For high-speed data transmission at the fire front, the system employs a swarm of 60 unmanned aerial vehicles (UAVs). These UAVs act as flying LTE (4G/5G) base stations, creating a dynamic and self-healing "data cloud" over the incident zone.

Layer 3: L-/Ka-band satellite backhaul (resilient connectivity): To ensure that the local network is never isolated, the architecture includes two mobile satellite gateways.

The network simulations presented validate the proposed multilayer communication architecture as a highly effective solution for modernising Bulgaria's forest fire response capabilities. The key findings – a 56% reduction in average incident response time and link availability above 99.7% – demonstrate a significant improvement over the current framework. The significance of this concept lies in its integrated, resilient design, which ensures operational compatibility and high-speed data flow in challenging environments. This hybrid network of unmanned aerial vehicles, ground assets and satellites represents a decisive step forward for Bulgaria's emergency services [94].

CHAPTER FIVE

ANALYSIS OF THE REGULATORY FRAMEWORK GOVERNING FOREST FIRE PREVENTION AND SUPPRESSION ACTIVITIES IN BULGARIA

The complicated fire situation in Bulgaria's forests at the end of the 20th century and the beginning of the 21st century shows that the effectiveness of the forest fire management system is not at the required level.

Forest fire management includes two main types of activity:

- preventive activity – aimed at preventing the occurrence of forest fires;
- operational activity – aimed at suppressing forest fires and eliminating their consequences.

The regulatory framework is of particular importance for the proper organisation of activity in both areas.

On the basis of the analysis carried out, the following conclusions have been formulated:

- The regulatory framework in Bulgaria governing forest fire prevention includes acts of different rank, with some documents containing overlapping texts and, in some cases, even certain contradictions.
- Most subordinate regulatory documents are linked to the adoption of the Forests Act in 2011, but despite this, a unified approach to forest fire management in Bulgaria has not been established, as the activity of the responsible institutions is regulated by a number of special laws.
- In legal and subordinate acts, the question of interaction of forces and resources remains underdeveloped, both in carrying out preventive activity and in participating in fire suppression operations during forest fires.

- In the criteria for establishing fire protection units, the presence of forest and field areas within the served territory has not been taken into account

SCIENTIFIC AND APPLIED CONTRIBUTIONS

1. A methodology for investigating combustion processes in different types of forest litter has been developed and experimentally validated, allowing quantitative determination of the influence of moisture content, temperature and other factors on the rate of combustion spread.

2. A volumetric (mass-based) method for determining the rate of fire spread in forest litter has been proposed, representing an original engineering solution that extends the experimental approaches used in forest fire research.

3. Relationships have been established between the dielectric characteristics of flammable material and the probability of occurrence and development of forest fires, creating prerequisites for their use in fire hazard assessment.

4. The possibility of using remote methods, including SAR technologies, in identifying different types of flammable materials and assessing the risk of forest fire occurrence has been demonstrated.

APPLIED CONTRIBUTIONS

1. A statistical analysis of the dynamics of forest fire occurrence in Bulgaria has been carried out and the indices of monthly and diurnal seasonality have been determined, representing a useful tool for planning preventive activities and resource provision for fire protection services.

2. A concept for a multilayer architecture for forest fire response has been developed, integrating unmanned aerial systems, LTE networks, TETRA communications and satellite channels.

3. Improvement of the organisation for investigating the causes of forest fire occurrence in Bulgaria and updating of the regulatory framework in this area has been proposed.

4. The use of remote means for monitoring forest fires has been proposed.

5. Organisational improvement of interaction between the individual institutions with responsibilities in the process of forest fire management in Bulgaria has been proposed.

LIST OF PUBLICATIONS ARISING FROM THE DISSERTATION

[1] I. Antonov, S. Antonov, and H. Dochev, „Estimation of Forest Fire Parameters by Joint Use of Geospatial Data and Geodetic Methods“ in Proc. 18th International Conference on ‘Communications, Electromagnetics and Medical Applications’ (CEMA’24), Sofia, Bulgaria, 2024, pp. 50-53., ISSN:1314-2100 SCOPUS Indexing, ID 6B4F77263D276412.

[2]. H. Dochev., A. Tzanova, and D. Spasov, „Thermo-physical characterization of coniferous litter for technical-assisted wildfire early warning – in Proc. 19th International Conference on ‘Communications, Electromagnetics and Medical Applications’ (CEMA’25), Athens, Greece, 2025, pp. 96-98, ISSN:1314-2100 SCOPUS Indexing, ID 6B4F77263D276412.

[3]. H. Dochev, A. Tzanova, and D. Spasov, „Comparative combustion analysis of deciduous forest litter with radar backscatter correlation“ in Proc. 19th International Conference on ‘Communications, Electromagnetics and Medical Applications’ (CEMA’25), Athens, Greece, 2025, pp. 99-101., ISSN:1314-2100 SCOPUS Indexing, ID 6B4F77263D276412.

[4]. H. Dochev, „Integrated communication architecture for forest-fire response in Bulgaria: gap analysis and design blueprint“, in Proc. 19th International Conference on ‘Communications, Electromagnetics and Medical Applications’ (CEMA’25), Athens, Greece, 2025, pp. 102-105, ISSN:1314-2100 SCOPUS Indexing, ID 6B4F77263D276412.

SUMMARY

FOREST FIRE DYNAMICS

MASTER OF ENGINEERING HRISIMIR HRISTOV DOCHEV

CONTENTS.

INTRODUCTION.

CURRENT STATE OF THE PROBLEM.

CHAPTER ONE

**ANALYSIS OF THE FIRE SITUATION IN THE FORESTS OF BULGARIA
AND ASSESSMENT OF THE FIRE MANAGEMENT SYSTEM.**

CHAPTER TWO

**DETERMINING THE INDICES OF MONTHLY AND DAY-NIGHT
SEASONALITY OF FOREST FIRES IN BULGARIA.**

CHAPTER THREE

EXPERIMENTAL PART.

CHAPTER FOUR

**INTEGRATED COMMUNICATION ARCHITECTURE FOR FOREST FIRE
RESPONSE IN BULGARIA.**

CHAPTER FIVE

**ANALYSIS OF THE REGULATIONS REGULATING THE ACTIVITIES OF
PREVENTION AND EXTINGUISHING FOREST FIRES IN BULGARIA.**

SCIENTIFIC AND APPLIED CONTRIBUTIONS.

APPLIED-PRACTICAL CONTRIBUTIONS.

LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION.

BIBLIOGRAPHY.

APPENDIXES