МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. ИВАН РИЛСКИ“ – СОФИЯ
МИННОТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ

КАТЕДРА: „РАЗРАБОТВАНЕ НА ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ“

маг. инж. ВЛАДИСЛАВ ИВАНОВ СТОЙКОВ

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДЮЗИ ЗА СИСТЕМИ С ВОДНА МЪГЛА ПРИ ГАСЕНЕ НА ПОЖАРИ В ИНЖЕНЕРНИ СЪОРЪЖЕНИЯ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

за придобиване на образователна и научна степен „доктор“ по професионално направление 5.8 Проучване, добив и обработка на полезни изкопаеми, научна специалност: „Техника на безопасността на труда и противопожарна техника“

Научни ръководители:
доц. д-р инж. Захари Динчев
доц. д-р инж. Александър Крилчев

СОФИЯ, 2026

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Разширения катедрен съвет на катедра „Разработване на полезни изкопаеми“ към Миннотехнологичния факултет на Минно-геоложкия университет „Св. Иван Рилски“, София, на 14.10.2026 г., съгласно заповед на Ректора № РД 13-45/12.10.2026 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на …… г. от …… часа в зала …… на МГУ „Св. Иван Рилски“, София, пред научно жури, утвърдено със заповед на ректора № …… от …… г.

Материалите по защитата са на разположение на заинтересованите лица в канцеларията на сектор „Следдипломна квалификация“ на МГУ „Св. Иван Рилски“, Ректорат, ет. 3, стая № 79, тел. 02/80 60 209.

Състав на научното жури

Вътрешни членове:
1. Проф. д-р Евгения Иванова Александрова — МГУ „Св. Иван Рилски“, катедра „РПИ“
2. Доц. д-р Благовеста Дианова Владкова — МГУ „Св. Иван Рилски“, катедра „ВТТ“

Външни членове:
1. Проф. д-р Даниела Димитрова Тодорова — Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“
2. Доц. д-р Веска Георгиева Лашева — Химикотехнологичен и металургичен университет, София
3. Доц. д-р Борислав Иванов Николов — Технически университет, София

Резервни членове:
1. Проф. д-р Ивайло Георгиев Копрев — МГУ „Св. Иван Рилски“, катедра „РПИ“.
2. Проф. д.н. Радослав Христов Кътов

Първото заседание на научното жури е насрочено за 28.10.2026 г. от 11:00 часа в Заседателната зала на Ректората, ет. 2, МГУ „Св. Иван Рилски“.

Рецензенти:

1. ……

2. ……

Дисертантът е докторант към катедра „Разработване на полезни изкопаеми“ на Миннотехнологичния факултет на МГУ „Св. Иван Рилски“.

Изследванията, представени в дисертационния труд, са извършени от автора.

Автор: маг. инж. Владислав Иванов Стойков

Заглавие: „Изследване на дюзи за системи с водна мъгла при гасене на пожари в инженерни съоръжения“

СЪДЪРЖАНИЕ

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД 4
II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД 6
ГЛАВА I. ПРЕГЛЕД НА СЪВРЕМЕННОТО СЪСТОЯНИЕ НА ПРОМИШЛЕНИТЕ ПОЖАРОГАСИТЕЛНИ СИСТЕМИ 6
I.1. Видове промишлени пожарогасителни системи. Принцип на работа. Значение. Приложение 6
I.2. Анализ и оценка на пожарогасителните системи 7
I.3. Основни изводи. Цели и задачи на изследването 8
ГЛАВА II. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИНАМИКАТА НА ПОЖАРИТЕ В ПЪТНИТЕ ТУНЕЛИ ВЪЗ ОСНОВА НА ФИЗИЧЕСКО И МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ 9
II.1. Същност и видове пътни тунели 9
II.2. Анализ на физическото моделиране на развитието на пожари 9
II.3. Анализ на резултатите от математическото моделиране на пожари 10
II.4. Управление на безопасността от пожар в пътните тунели 11
Изводи към втора глава: 12
ГЛАВА III. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДЮЗИ ЗА ПОЖАРОГАСИТЕЛНИ СИСТЕМИ С ВОДНА МЪГЛА 13
III.1. Разработване и реализиране на стенд за изследване на дюзи 13
III.1.1. С вертикално разпръскване 13
III.1.2. С хоризонтално разпръскване 17
III.2. Моделиране и гасене на проектен пожар със стационарна пожарогасителна система с водна мъгла при ниско налягане 23
III.3. Основни изводи и препоръчвани параметри 24
ГЛАВА IV. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФИЗИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ПОЖАРОГАСИТЕЛНИ СИСТЕМИ С ВОДНА МЪГЛА 26
IV.1. Разработване на физически модел на пожарогасителни системи с водна мъгла 26
IV.2. Експериментални изследвания и обработка на резултатите 27
IV.3. Параметричен анализ на модела за взаимодействие на водна мъгла и вентилация при пожар в пътни тунели 30
IV.4. Методика за създаване на модел на стационарна пожарогасителна система в тунел 31
IV.4.1. Общи положения 31
IV.4.2. Взаимодействие с други системи 31
IV.4.3. Хидравлично оразмеряване 32
IV.4.4. Проектно решение на стационарна пожарогасителна система 32
IV.4.5. Видове и размери на превозните средства, преминаващи през тунели 34
IV.4.6. Монтаж и въвеждане в експлоатация на стационарна пожарогасителна система 34
IV.4.7. Активиране и работа на системата 35
IV.4.8. Поддръжка на компонентите на стационарна пожарогасителна система 35
ГЛАВА V. ОСНОВНИ ИЗВОДИ, НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ 36
V.1. Основни изводи 36
V.2. Научни и научно-приложни приноси 36
V.3. Допълнителни изводи за приложението на системи с водна мъгла при ниско налягане: 37
СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД 38
ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА 39

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Пожарите в инженерни съоръжения като пътни тунели, трафопостове, промишлени сгради, производствени цехове и подземни гаражи, представляват значителна опасност за човешкия живот и могат да причинят сериозни щети на отделните елементи или на цялата конструкция. През последните десетилетия редица пожари в тунели водят до човешки жертви и нарушения на пътната инфраструктура, които оказват влияние и върху икономиката. Сред факторите, увеличаващи риска, са нарастването на пътния трафик, превозът на опасни товари и несъответствието между пропускателната способност на съоръженията и транспортното натоварване.

За подобряване на безопасността в тунелите са необходими технически и организационни мерки за предотвратяване на инциденти и ограничаване на последиците от тях. Пожарите могат да причинят повреди на конструкцията и инфраструктурата, наранявания и човешки жертви вследствие на високите температури и отделянето на токсични газове. Основно внимание следва да се отдели на ограничаването на горенето в началния стадий, защитата на конструктивните елементи и осигуряването на условия за евакуация.

Последиците от пожар зависят до голяма степен от едновременното развитие на пожара и протичането на евакуацията.

Същността на системата за противопожарна защита с водна мъгла, използвана за контрол и/или гасене на пожари, се изразява във въвеждане фини капки във вид на мъгла в зоната на горене. Целта е постигане на по-ниска мощност и температура на пожара, разреждане на кислорода с водни пари и намаляване на инфрачервеното излъчване. Освен това пожарът се гаси или поддържа на ниско енергийно ниво, което значително облекчава гасенето. Прилаганите системи от този тип изискват високо налягане от 36 до 160 bar и самостоятелна тръбопроводна система и арматурно окачване. Тези изисквания до известна степен оскъпяват изграждането и поддържането на разглежданите системи, поради което рядко се прилагат.

Основен обект на изследване в дисертационния труд са дюзите за генериране на водна мъгла и възможностите за тяхното приложение в пожарогасителни системи за инженерни съоръжения.

Чрез разработен експериментален стенд са извършени научни и научно-приложни изследвания на два вида фини дюзи. Определени са специфичните им параметри и характеристики, резултатите от които могат да бъдат използвани при проектирането и апробирането им за системи за противопожарна защита с водна мъгла в действащи обекти и конкретно в условията на пътни тунели. Същевременно, постигнатите резултати ще доведат до разширяване областта на приложение на този тип пожарогасителни системи.

Цел на дисертационния труд

Основната цел на дисертационния труд е ***изследване на дюзи за водна мъгла и разработване на модел на пожарогасителна система за пътни тунели***. Системата е предназначена да ограничава топлинната мощност и температурата на пожара и да подпомага безопасната евакуация и защитата на инфраструктурата в тунелите.

За постигане на поставената цел са решени следните основни задачи:

1. Проучване на възможностите за приложение на водна мъгла с ниско налягане в пътни тунели

2. Изследване на динамиката на пожарите в пътните тунели въз основа на математическо и физическо моделиране

3. Анализ на различните типове разпръскващи дюзи и тяхното влияние върху разпределението на водната мъгла.

4. Разработване и реализиране на стенд за изследване на дюзи за пожарогасителни системи с водна мъгла

4.1. С вертикално разпръскване

4.2. С хоризонтално разпръскване

5. Моделиране и гасене на проектен пожар със стационарна пожарогасителна система с водна мъгла при ниско налягане.

6. Изследване на физически модел на пожарогасителни системи с водна мъгла

За решаване на поставените задачи се използват следните методи:

1. Литературен обзор и анализ на нормативни и технически документи.

2. Анализ на математически модели и резултати от пълномащабни пожарни изпитвания.

3. Сравнителен анализ на технически характеристики и експериментални данни за различни видове дюзи.

4. Експериментално проектиране, конструиране и измерване.

5. Контролирани изпитвания в експериментален тунел.

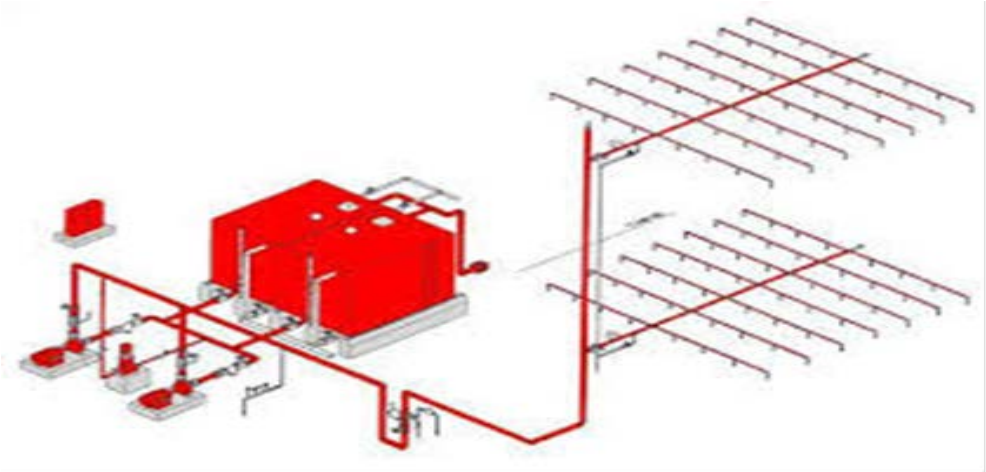
6. Физическо и математическо моделиране, параметричен анализ и обобщаване на експерименталните зависимости.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА I. ПРЕГЛЕД НА СЪВРЕМЕННОТО СЪСТОЯНИЕ НА ПРОМИШЛЕНИТЕ ПОЖАРОГАСИТЕЛНИ СИСТЕМИ

I.1. Видове промишлени пожарогасителни системи. Принцип на работа. Значение. Приложение

Най-разпространените гасителни инсталации, ползващи вода са т. нар. спринклерни или дренчерни инсталации. Спринклерните пожарогасителни инсталации представляват система от тръби, през които преминава вода под налягане (фиг. 1). Захранването се извършва от независим водоизточник, който трябва да бъде с достатъчна вместимост за осигуряване на водоподаването при максимално натоварване за определен период от време. Налягането по тръбопроводната система се осигурява от помпи и цялата система е под постоянен контрол. Когато при един или повече от автоматичните спринклери възникне топлинно въздействие, те се активират, позволявайки на водата да изтече през тях. Водният поток се сблъсква с дефлектор, който разпръсква водата в определени по размер и гасителни свойства посоки. Отварят се само спринклерните глави, които се намират над огнището на пожара или в близост до него, т. е. чието действие е необходимо за гасенето. Това е най-често срещаната система с доказана широка област на приложение, например за защита на складове, офиси, промишлени и търговски обекти.



Фигура 1. Принципна схема на пожарогасителна система
https://megaelectronics.bg/izgrazhdane-na-sprinklerni-sistemi/

В практиката се използват и двуфлуидни дюзи за генериране на водна мъгла, при които водата се разпрашава чрез взаимодействие със сгъстен газ, например въздух или азот. При водно-въздушните дюзи енергията на въздушния поток подпомага раздробяването на водата на фини капки. Този механизъм позволява генериране на водна мъгла при сравнително ниско налягане на водата, като характеристиките на разпръскването зависят от конструкцията на дюзата, наляганията и съотношението на дебитите на двата флуида (Gupta и др., 2012; Jeong и Lee, 2021).

I.2. Анализ и оценка на пожарогасителните системи

При избора на вида на пожарогасителната система в пътните тунели е необходимо да се извърши анализ и оценка както на възможностите за приложение на защитни устройства, така и на специфичните характеристики на пожарите чрез прилагане на системен подход за осигуряване на безопасността на движение.

Гасенето с водна мъгла в пътни тунели се основава на създаване на максимален охлаждащ ефект в зоните на пожара, с оглед намаляване на последиците за пътниците, конструкцията на тунела и съоръженията в него. Водната мъгла притежава универсалното свойство да гаси или потиска пожари при обикновено горимите материали.

I.2.1. Видове пожари

Стандартът NF EN 2 разграничава класове пожари според вида на горимото вещество:

- ✓ клас A – пожари на твърди материали, обикновено произвеждащи жарава при изгаряне;
- ✓ клас B – пожари на горими течности и твърди материали, които при запалване се топят и горят като течности;
- ✓ клас C – пожари на горими газове;
- ✓ клас D – пожари на метални материали;
- ✓ клас F – пожари на масла и мазнини, използвани в уреди за готвене.

Последният клас отчита специфичните характеристики на продуктите, използвани в готварството (масла и мазнини), въпреки че на пръв поглед са сходни с тези от клас B.

Приложимостта на водната мъгла за гасене на електрически съоръжения под напрежение, масла и мазнини се определя за конкретната система чрез изпитвания и указанията на производителя. Тя не следва да се приема за универсално приложима при пожари на метали или на вещества, които реагират опасно с вода.

В зависимост от скоростта на отделяне на топлина (HRR) от пожара в периода на разгаряне, когато се включва системата с водна мъгла, тя може да постигне:

- ✓ гасене на пожара;
- ✓ предотвратяване на разпространението на пожара извън зоната на възникване;
- ✓ потискане развитието на пожара на ниско енергийно ниво, чрез намаляване скоростта на отделянето на топлина.

I.2.2 Елементи и принцип на действие на пожарогасителни системи с водна мъгла

При използване на съвременните технологии могат да се генерират различни размери на капчици чрез изменение на налягането при преминаване на водата и геометричните параметри и размери на дюзата за разпръскване (табл. 7). Анализът на съществуващите методи за разпръскване на водата показва, че съществуват два вида системи, които се отличават в зависимост от разпределението на размера на капчиците. Първият вид системи са *системите водна мъгла* и вторият вид – системите с големи капчици, наричани още „*спринклери*”.

Таблица 7. Характеристики на водната мъгла

Диаметър на капката	Реакционна повърхност на литър вода	Пожарогасителна система
1 mm	2 m^2	Напоителна система
0,1 mm	20 m^2	Спрей за фина вода
0,01 mm	200 m^2	Водна мъгла

В таблица 8 са класифицирани системите за водна мъгла в зависимост от минималното работно налягане, съгласно NFPA 750.

Таблица 8. Типове системи за водна мъгла

Минимално работно налягане	Тип система
> 35 бара	Система за високо налягане
12 - 35 бара	Система за средно налягане
<12 бара	Система за ниско налягане

В таблица 10 е представена класификацията на водната мъгла, съгласно NFPA 750. Практическият опит показва, че Клас III водни мъгли са подходящи за клас „А“ пожари, тъй като размерът на капчиците им позволява да достигнат повърхността на твърдото горимо вещество, при условие, че не е покрито и следователно може да доведе до охлаждане на горимото вещество. Независимо от това, този тип водни мъгли са с по-ниска степен на ефективност в сравнение с тези от клас I за охлаждане на газовата фаза (въздух и дим). В действителност, при капчиците с по-големи размери съотношението повърхност към обем е по-малко, което намалява преноса на топлина между газа и течността. Поради тази причина топлинната абсорбция по време на изпаряването на капчиците и поглъщането на радиацията е по-ниска за по-големите капчици.

Таблица 10. Класификация на водната мъгла съгласно NFPA 750

Клас I	Клас II	Клас III
$D_{v0.9} \leq 200$ μm	200 μm $\leq D_{v0.9} \leq$ 400 μm	400 μm $\leq D_{v0.9} \leq$ 1000 μm

I.3. Основни изводи. Цели и задачи на изследването

Системата за водна мъгла има както предимства, така и недостатъци. Тя оказва значително влияние върху аеро- и термодинамиката в пътните тунели, включително върху съпротивлението на въздушния поток, скоростта на движение, разпределението на температурата и разпространението на дима.

Необходимо е прецизно съгласуване на действието на водната мъгла с аварийната вентилационна система. За оптимизирането му са необходими теоретични анализи и експериментална проверка на резултатите от численото моделиране.

ГЛАВА II. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИНАМИКАТА НА ПОЖАРИТЕ В ПЪТНИТЕ ТУНЕЛИ ВЪЗ ОСНОВА НА ФИЗИЧЕСКО И МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ

II.1. Същност и видове пътни тунели

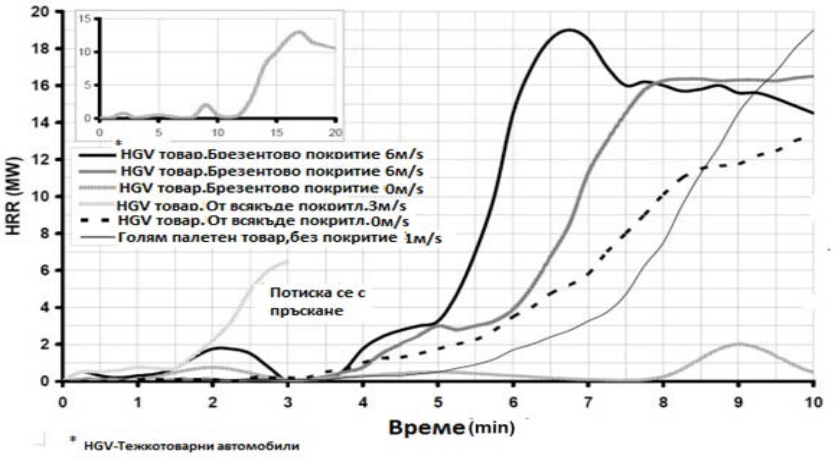
Пътният тунел се дефинира като затворено пътно трасе, предназначено за движение на моторни превозни средства, с достъп, ограничен единствено чрез портали, независимо от типа конструкция или метода на изграждане. Поради своята специфичност, пътният тунел изисква – по преценка на собственика или отговорния проектант – специализирани проектни съображения, свързани с осветление, вентилация, противопожарна защита и осигуряване на възможности за аварийна евакуация.

Формата на тунела се определя от неговия външен контур (екстериор), който в повечето случаи е резултат от избрания метод на изграждане. Въпреки конструктивното разнообразие, вътрешната геометрия на тунела обикновено е правоъгълна, с цел осигуряване на ефективно и безопасно движение на моторни превозни средства. Геометрията по дължината на тунела може да бъде променлива, особено при наличие на различни конструктивни участъци, изградени чрез различни технологии за прокарване на тунели. Промените в напречните сечения обикновено са обусловени от преминаване от един метод на изграждане към друг – например от пробивно-взривен към „cut-and-cover“ метод.

II.2. Анализ на физическото моделиране на развитието на пожари

Пожарните тестове, проведени в тунела Рунехамар през 2003 г., изследват фазите на запалване и развитие. По време на фазата на развитие скоростта на надлъжната вентилация в тунела е приблизително 2,5 m/s при всеки от тестовете, а интензивността на топлинното отделяне (HRR) нараства постепенно.

На графиката на фигура 36 са представени данни за тежкотоварен автомобил (HGV) с брезентово покритие на товара и при отсъствие на значителен надлъжен въздушен поток, като HRR не показва съществено увеличение до около 10 минути след запалването.



Фигура 36. Вид на пожар – време за потискане, чрез пръскане

Пожарите в отделенията често се моделират с помощта на „t^2-пожар“ (Directorate-General for Public Works and Water Management, 2002), при който скоростта на отделяне на топлина се приема, че нараства пропорционално на квадрата на времето след запалването. Според тази класификация пожарите се разделят на

„бавни“, „средни“, „бързи“ и „свръхбързи“, със съответни коефициенти на пропорционалност приблизително 3, 11, 44 и 178 [W/s²].

Нито един от разгледаните експерименти не може адекватно да се моделира с „t^2-пожар“. В повечето случаи първоначалният темп на нарастване е сходен с този на пожар със „средна“ скорост, но впоследствие се наблюдава преход към ръст, надвишаващ този на „свръхбърз“ пожар. Вместо параболична зависимост между топлинното отделяне и времето, тези експерименти се описват по-добре чрез линейна аппроксимация на два етапа:

- **Първи етап** – бавен растеж от запалването до мощност от 1–2 MW.
- **Втори етап** – бърз растеж от няколко MW до десетки MW.

Анализът на данните показва две основни зависимости:

- Скоростта на вентилация влияе върху времето, необходимо за преминаване от фазата на запалване към фазата на бърз растеж на пожара.
- Интензивността на нарастване на пожара във втората фаза зависи от скоростта на вентилацията, като по-високата скорост вероятно води и до по-бързо развитие на горенето.

II.3. Анализ на резултатите от математическото моделиране на пожари

При дефиниране на симулирания пожар, времето за откриване, нарастването на пожара и активирането на системата за пожарогасене трябва да бъдат внимателно оценени. От особено значение е ясно да бъдат дефинирани възможностите на системата за откриване и времето за активиране на аварийните вентилационни и потискащи системи. В голям брой от случаите, закъснението между откриването на пожара и активирането на системата може да достигне до няколко минути. Ако такова забавяне съществува, важна характеристика на системата е способността ѝ за откриване и локализиране на малък пожар (приблизително с мощност 1 MW) по време на „фазата на забавяне“. В противен случай, ако пожарът не бъде открит навреме, докато не премине в интензивната фаза на растеж, след активирането на системата за пожарогасене, пожарът ще се развие извън обхвата на водната мъгла.

Това подчертава необходимостта оценката на експлоатационните характеристики на системата за водна мъгла да бъде в пряка зависимост от характеристиките на системата за откриване. Въз основа на това, детайлите в оценката на ефективността на системата за откриване трябва да бъдат съпоставими с тези на водната мъгла.

Въз основа на горепосочените наблюдения, при дефинирането на проектния пожар, е важно да се вземат предвид и условията на вентилация, които ще се проявят при реален пожар в тунела.

Изчисленията се извършват на основата на моделиране на т.нар. проектни пожари (design fires). Целта на такова моделиране е да се определи очакваната динамика на развитието на пожара при отсъствие на пожарогасителна намеса. Получените резултати служат като входни данни за проектиране на системите за пожарогасене с водна мъгла.

Проектният пожар се дефинира въз основа на следните основни параметри:

- Геометрични характеристики на помещението (размери, форма, обем);
- Вид и пространствено разпределение на горимите материали;
- Характеристики на вентилацията – наличие и тип (естествена или механична).

Размерът на водните капки е от съществено значение за механизма на взаимодействието им с пламъка и горящата повърхност. Финоразпръснатите капки с

малък диаметър обикновено се изпаряват в газовата зона над огнището, като допринасят предимно за охлаждането на димните газове и за инертизацията чрез отделяне на водна пара. По-едрите капки успяват да навлязат в зоната на пламъка, като абсорбират по-големи количества топлина преди да се изпарят. Само най-едрите капки достигат до горящата повърхност, където могат да окажат директен охлаждащ ефект върху материала.

С повишаването на температурата на газовата среда намалява разстоянието, което капките изминават до пълното си изпарение. С увеличаването на диаметъра им това разстояние нараства. Зависимостите са представени в табл. 21 и са съществени при избора на дюзи за конкретния пожарен сценарий.

Таблица 21. Газовата фаза през която капките преминават

Температура [°C]	Типично разстояние на падане на капка с диаметър [μm]				
	10	*50*	*100*	*500*	*1 000*
400	15 nm	9.1 μm	146 μm	2.5 m	9.9 m
600	9 nm	5.5 μm	87 μm	1.5 m	6.0 m
800	6 nm	3.9 μm	63 μm	1.1 m	4.3 m
1 000	5 nm	3.0 μm	49 μm	0.5 m	3.3 m

II.4. Управление на безопасността от пожар в пътните тунели

Безопасността в тунелите следва да се оценява за всички лица, които ги използват за преминаване, обслужване или действия при инциденти и кризисни ситуации. Разглеждат се следните групи:

• потребители на тунели;

• персонал по поддръжката и експлоатацията на тунелите;

• персонал на спешните служби и

• хора извън тунела (например хора в сгради над тунела или близо до входовете).

Стационарната пожарогасителна система може да подобри условията при пожар, като ограничи разпространението на огъня, понижи температурата на газовете и намали лъчистите топлинни потоци. Ранното ѝ активиране е съществено за подпомагане на евакуацията. Влиянието върху концентрациите на токсични газове и дим обаче трябва да се оценява съвместно с вентилационния режим, тъй като потискането на горенето не гарантира само по себе си намаляване на всички опасни продукти (Bergeson и др., 2020).

Предимството на стационарните пожарогасителни системи е, че те забавят скоростта на разпространение на пожара и следователно оцеляването на всеки пострадал се увеличава, както и потенциалът за реагиращите да спасят всеки, който е ранен и не може да се евакуира самостоятелно. Тестовете и изчислителните анализи показват, че вертикалният импулс на активирана стационарна пожарогасителна система може да пренася по-високите концентрации на токсични газове в горните нива на напречното сечение на тунела към долните части, този ефект е наблюдаван при измервания на пълномащабни тестове, („Пожарни тестове за системи за потушаване на пожар с водна мъгла в пътни тунели, под земята“) (Leucker и Leismann, 2013). Въпреки че не е наблюдаван неблагоприятен ефект от това явление при реални събития, включващи активиране на стационарна пожарогасителна система, това отново подчертава важността на стратегията за активиране и на вентилационната система за защита. Видимостта представлява критичен фактор за ефективното самоспасяване в условията на пожар. Прилагането на стационарни пожарогасителни системи оказва въздействие върху видимостта, поради аерозолните ефекти, предизвикани от водната мъгла или разпръснатите

капки, които допълнително ограничават зрителната яснота в засегнатата зона. Това влошаване на видимостта следва да бъде отчетено при разработването на стратегии за евакуация и управление на риска в пътни тунели.

При активиране на стационарна пожарогасителна система охлаждането и импулсът на водната струя могат да нарушат стратификацията на дима и да пренесат димни газове към зоната за евакуация. Това въздействие следва да се отчита при съгласуването на пожарогасителната и вентилационната система (Bergeson и др., 2020).

Изводи към втора глава:

Скоростта на развитие на пожара и големината на пожара са от съществено значение по отношение на безопасността на тунелите. И двете са повлияни от естеството на пожарното натоварване, техническите условия на участващите превозни средства, условията на въздушния поток в тунела по време на развитие на пожара, както и инженерния проект за пожарна безопасност на конкретния тунел.

Максималната скорост на отделяне на топлина при пожар зависи от количеството и вида на горимите материали, формиращи пожарното натоварване, условията за подаване на кислород, характеристиките на тунела и действието на противопожарните системи. При пожари на леки автомобили скоростта на отделяне на топлина обикновено е сравнително ниска. За разлика от тях, при напълно развити пожари на товари в тежкотоварни автомобили и при пожари на разлято течно гориво могат да се достигнат много високи стойности на този показател.

ГЛАВА III. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДЮЗИ ЗА ПОЖАРОГАСИТЕЛНИ СИСТЕМИ С ВОДНА МЪГЛА

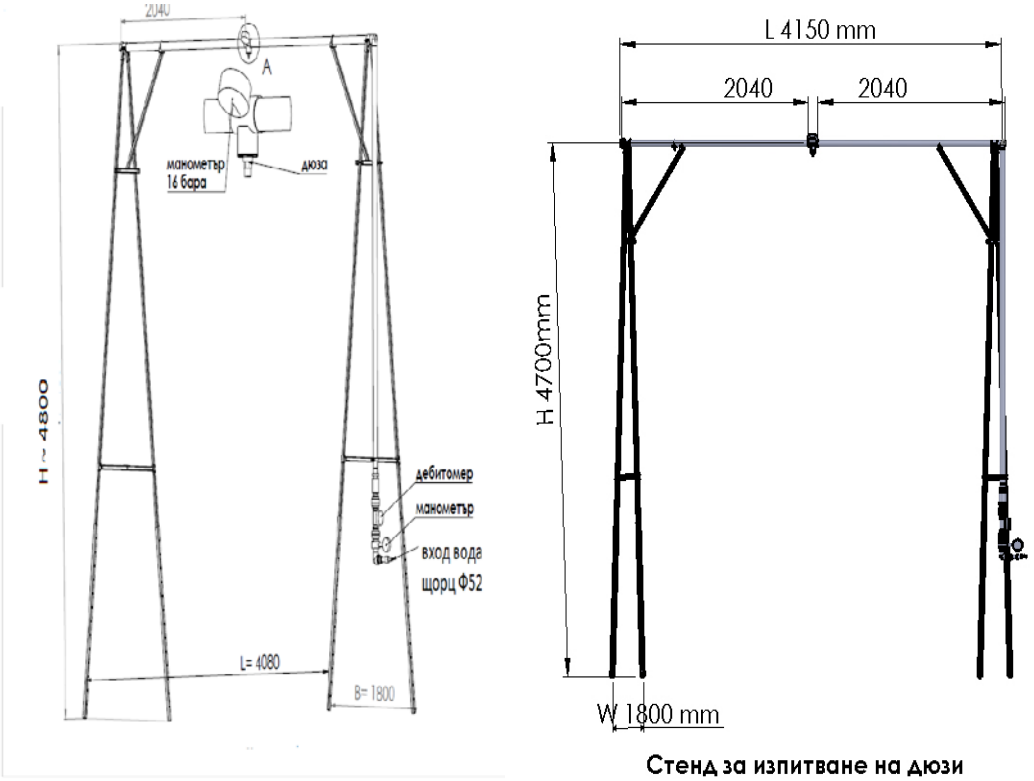
III.1. Разработване и реализиране на стенд за изследване на дюзи

III.1.1. С вертикално разпръскване

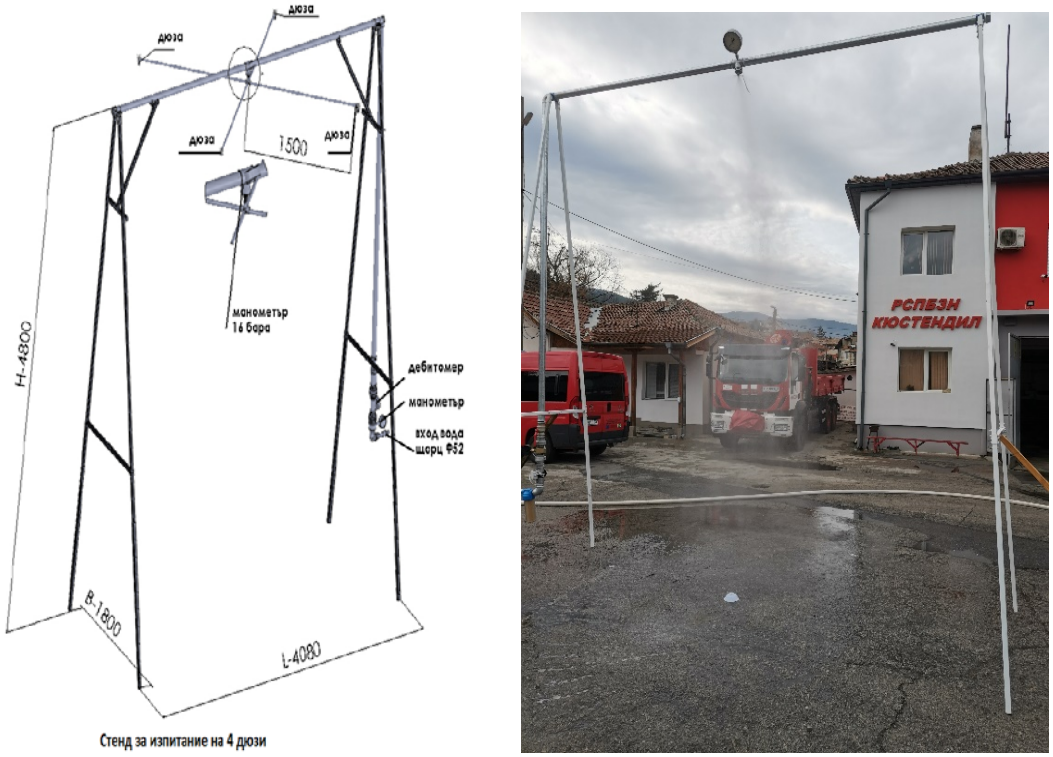
Във връзка с изложеното до момента, са проведени експериментални изследвания, насочени към проучване и моделиране на стационарна пожарогасителна система на водна основа с ниско налягане, предназначена за противопожарна защита (ППЗ) в пътни тунели чрез използване на водна мъгла. Основната цел на проведените изпитвания е да се оцени ефективността и да се потвърди достоверността на твърденията, относно производителността и ефективността на системите и дюзите, генериращи фина водна мъгла от малки водни капчици при ниско работно налягане в диапазона 3,5–16 bar.

По време на изследването са проведени серия експериментални тестове. На първия етап са извършени изпитвания за образуване на фини водни капчици с диаметър до 1000 μm чрез дюза, монтирана на специализиран стенд за изпитвания, който осигурява вертикално разпръскване на водната мъгла към асфалтовата настилка на експерименталния полигон. На втория етап са реализирани тестове за гасене на пожар, при които водната мъгла се разпръсква хоризонтално чрез вентилаторна система спрямо настилката на пода на експерименталната уредба, симулираща условията в пътен тунел.

На фигура 43 е представен общият вид на проектирания стенд, предназначен за тестване на дюзи, генериращи фина водна мъгла при ниско работно налягане. Стендът позволява позициониране на дюзата на работна височина (H) в интервала от 4,7 m до 5,8 m, като е предвидена възможност за вертикална корекция със стъпка от 1 m. Стендът е с осигурено отстояние от захранващата вертикална тръба и другия свободно стоящ край на арматурата с по 2,04 m в двете посоки от дюзата.



Стенд за изпитване на дюзи



Фигура 43. Стенд за изпитване на дюзи

Стендът, използван при експерименталните изследвания, е самостоятелно проектиран и конструиран от докторанта с цел осигуряване на подходяща експериментална среда за изследване на характеристиките на пожарогасителни системи с водна мъгла при ниско работно налягане. При разработването на конструкцията са приложени специализирани инженерни решения, съобразени с технологичните особености на системите за пожарогасене на водна основа, както и със специфичните условия за тяхното непосредствено приложение в тунели.

Първите тестове са проведени със стенд за разпръскване на водна мъгла при ниско налягане, като струята е насочена вертикално спрямо посоката на асфалтовата настилка. В експериментите се използва изпитваната дюза GW M5 на GW Sprinkler A/S (2018) (фиг. 46). Това е компактна дюза, която генерира фина водна мъгла при ниско налягане. Тя е специално разработена за цялостни и локални защитни системи с водна мъгла, подходяща както за морски, така и за наземни приложения, включително пътни тунели.



Фигура 46. Дюза GW M5

При изпитванията се оценява съответствието с параметрите, зададени от производителя. В таблица 27 са представени стойностите на дебита на дюза GW M5 в зависимост от налягането, получени при изпитванията.

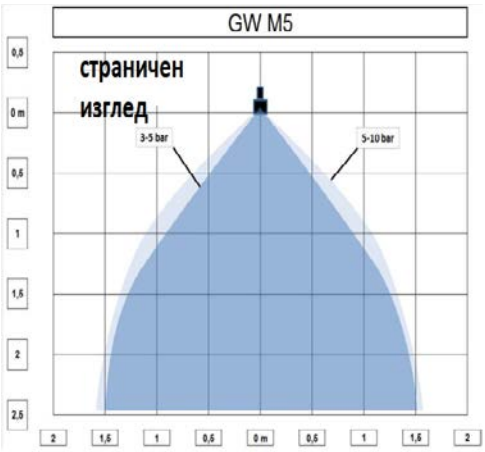
Таблица 27. Разходни характеристики GW модел M5, разход воден поток в зависимост от налягането

Съотношение воден поток/налягане, Q (P)				
Налягане - P, Bar	**√ P**	**К-фактор**	**Воден поток - Q, ℓ/min**	**К-фактор-среден**
3	1,73	5,00	8,65	**5,003**
4	2	5,00	10	
5	2,24	4,98	11,16	
6	2,45	4,99	12,23	
7	2,65	5,01	13,28	
8	2,83	5,01	14,18	
9	3	5,03	15,09	
10	3,16	5,01	15,83	
11	3,32	5,01	16,63	
12	3,46	4,99	17,27	

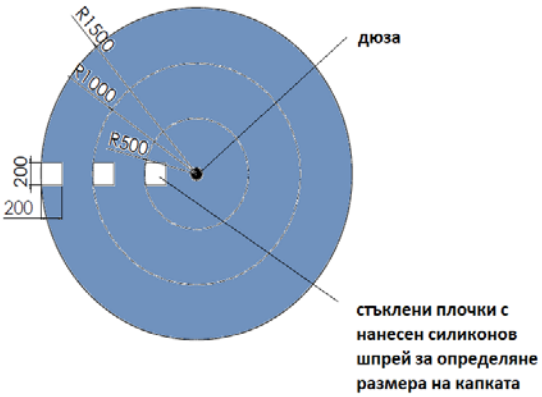
Основната цел на тестовете е да се определят размера и броя на произвежданите водни капки, както площа и плътността на покритие.

Зоната на покритие при работа с дюза GW модел M5 достига диаметър до 3,2 m при съответното работно налягане, представено на фиг. 51. С цел експериментално определяне на реалното покритие при вертикално разпръскване на водна мъгла са използвани стъклени плочки с размери 0,2 × 0,2 m (фиг. 53), разположени хоризонтално на нивото на терена на разстояния с радиус 500 mm, 1000 mm и 1500 mm от центъра на дюзата. Плочките са предварително обработени със силиконово масло с цел запазване на формата на попадналите капки и осигуряване на възможност за определяне на техния брой и размер в зависимост от разстоянието.

На фигура 52 е представена схемата на разполагане на експерименталните плочки на трите радиални отстояния. Нанесеният силиконов слой способства за точно регистриране на характеристиките на водните капки при разпръскването на водната мъгла.



Фигура 51. Страничен изглед – вертикално разпръскване на водна мъгла, диаметър на покритие



Фигура 52. Графика - Радиус (R) на разпръскване на водна мъгла от дюза GW M5

Общата постановка на експерименталната методика включва използването на стъклена плочка с милиметрова хартия за калибриране на мащаба, като при увеличение 150 % е определен мащаб 39 × 39 μm (фиг. 53). При реален размер на милиметровата скала 10 mm е установено съотношение 10:39 = 2564 μm, като за целите на анализа е приет опростен мащаб 1:250 μm.

Размерът на капките се определя по черния отпечатък, образуван от силиконовото масло, което обгръща водната капка и впоследствие се разлива върху

повърхността на стъклото. Приема се, че полученият отпечатък отговаря на приблизителния диаметър на капката. Измерванията са извършени с помощта на графичния редактор на програмата „Photoscape“.

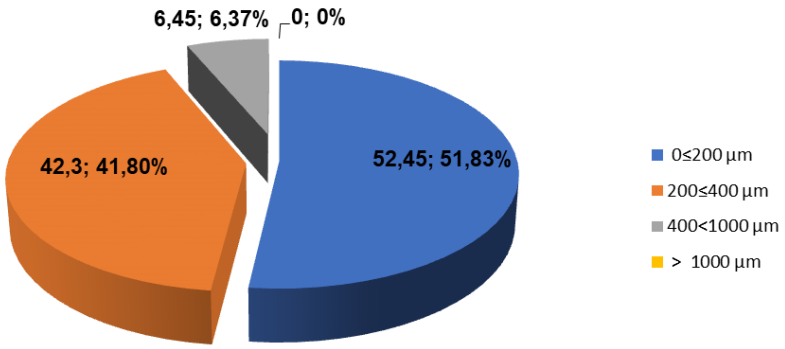


Фигура 53. Експериментална плочка

Получените резултати и измервания от експерименталните опити са отразени в табл. 28 и графично изобразени на фиг. 57. Разпределението на капките е по размер (Dp) и на радиус (R) от дюзата. При извършеният експеримент се установи, че няма капки с диаметър по-голям от 1 mm или 1000 μm.

Таблица 28. Разпределение на капките по размер-Dp на радиус R от дюзата

Клас	Диаметър на капките,Dp	Радиус върху оросяваната повърхност, R			Диаметър на капките на разстояние от дюзата, μm			Диаметър на капките - min-max, μm	Брой на капките, %	Брой капки - осреднен, %	Брой капки - приравнен, %	Класове на водната мъгла по размери Dp на капките
		500 mm	**1000 mm**	**1500 mm**	**500 mm**	**1000 mm**	**1500 mm**					
1	0≤200	240	180	156	0-200	0-200	0-200	0-200	от 50,8 до 54,1	52,45	52	**1**
2	200≤400	180	156	126	225-398	225-388	250-393	225-398	от 40,5 до 44,1	42,3	42	**2**
3	400<1000	24	18	24	500-750	750-950	625-967	500-967	от 5,1 до 7,8	6,45	6	**3**
4	1000>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**4**
Капки по R		**444**	**354**	**306**								
Общо капки по R		**1104**								**101,2**	**100**	



Фигура 57. Класове на водната мъгла по размери Dp на капките

На база на получените експериментални резултати и извършените изчисления е определена минималната плътност на покритие на водния поток върху разглежданата площ. Изчислителният алгоритъм се осъществява по следния начин:

➢ При диаметър на разпръскване D – 3 m; налягане P – 6 bara; воден поток – 12,23 ℓ/min:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3{,}14.3^2}{4} = 7{,}065\,m^2 \qquad \text{(III. 1)}$$

където S е площта на покритие [m²]; D - диаметърът на покритие, m;

$$Q_{екс.} = \frac{Q_{поток}}{S} = \frac{12{,}23}{7{,}065} = 1{,}73\,mm/\min \qquad \text{(III.2)}$$

$Q_{екс.}$ - средната интензивност на оросяване (плътност на водното покритие), mm/min;

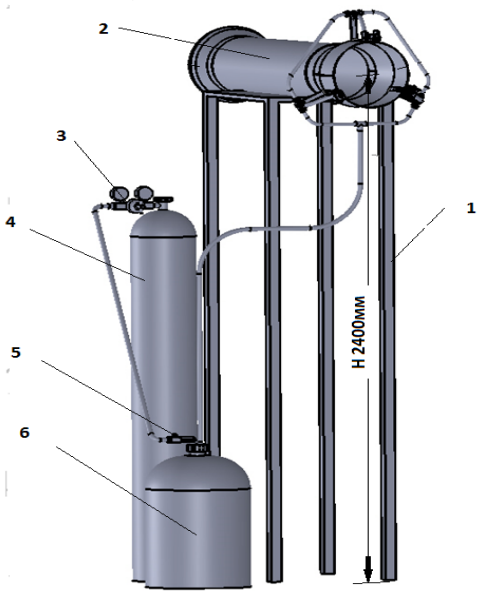
$Q_{поток}$ - обемният дебит на дюзата, ℓ/min;

S - площта на покритие, m². Използва се равенството 1 ℓ/(m²·min) = 1 mm/min; в примера $Q_{поток}$ = 12,23 ℓ/min.

III.1.2. С хоризонтално разпръскване

Разработването на стенда и изследванията с хоризонтално разпръскване са базирани на предварителни проучвания и симулационни тестове със стационарни пожарогасителни системи, разпръскващи воден агент чрез струен вентилатор. В конкретния случай е проектирана и моделирана изпитвателна уредба на стационарна пожарогасителна система с вода при ниско налягане, осигуряваща хоризонтално разпръскване на водна мъгла чрез промишлен вентилатор, чиито принцип на работа наподобява ефекта на струен вентилатор.

Изследваната система, представена на фигура 58 и фигура 59, се състои от компоненти и елементи, моделирани в определен ред, които са оптимално съобразени с условията на експерименталните тестове. В реални експлоатационни условия монтажът на системи с водна мъгла и хоризонтално разпръскване трябва да се извършва единствено от квалифицирани специалисти, притежаващи необходимите умения и познания за инсталиране на спринклерни системи. Това е необходимо, за да се минимизират рисковете от неправилно функциониране на системата, породено от неспазване на инструкциите и предпазните мерки.



Фигура 58. Схема на изследваната система

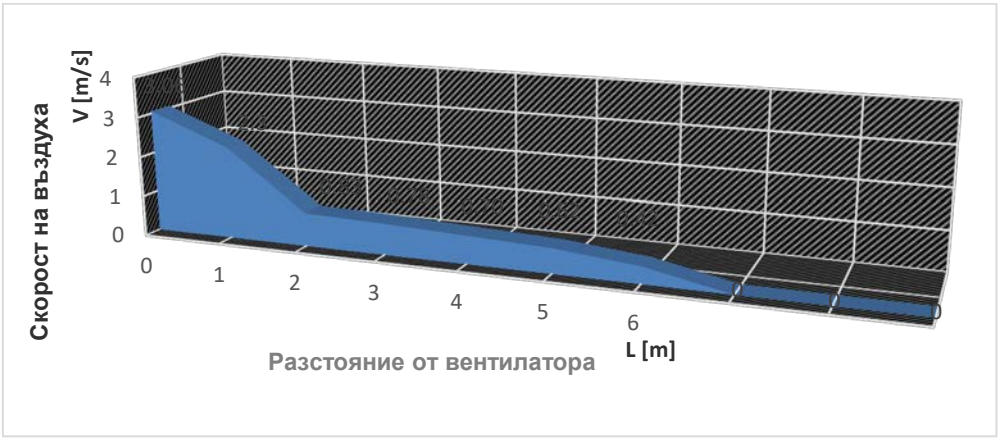
1-стойка; 2-основна изпитателна конструкция; 3-регулатор налягане; 4-бутилка азот; 5-сферичен кран; 6-съд за вода - 11литра за подаването на течността под налягане



Фигура 59. Модел на уредба на стационарна пожарогасителна система

Преди започване на моделираните експерименти със стационарна пожарогасителна система с хоризонтално разпръскване на водна мъгла са измерени скоростта на въздушния поток при работа на вентилатор СК 250 А на максимална скорост. Измерванията са извършени с помощта на анемометър TESTO 435 (Германия, рег. № DM/034 112, фиг. 71), като са регистрирани стойностите на скоростта на въздуха [m/s] и температурата [°C] на въздушния поток при конуса и на разстояние от 1,0 m до 6,0 m след него. Получените резултати показват диапазон на скоростта от 0,42 m/s до 3,06 m/s (фиг. 71 – фиг. 77), а температурата на въздушния поток се колебае между 28 °C и 29 °C.

Измерванията до 6,0 m от конуса са обосновани от факта, че в експерименталните условия разпръскването на водната мъгла от вентилатор СК 250 А достига именно това отстояние, което го прави критично за определяне на ефективността на системата в експерименталния тунел. Графичното представяне на промяната на скоростта на въздушния поток в моделирания тунел е показано на фиг. 70.

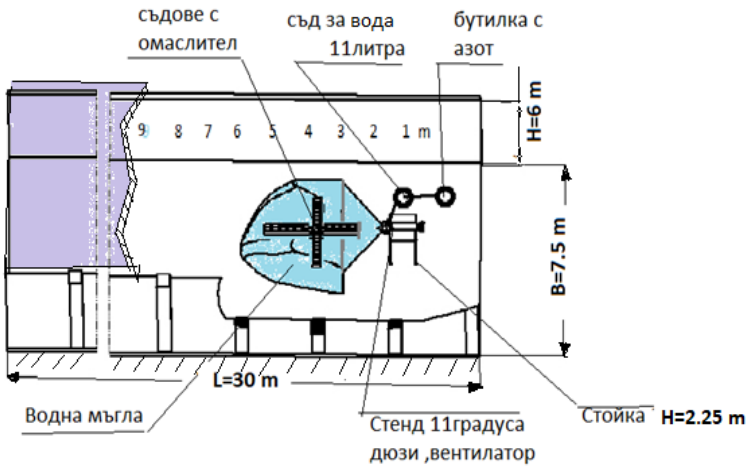


Фигура 70. Скорост на въздушния поток от вентилатор СК 250 А в моделирания тунел

Тунелът за извършване на настоящите тестове е моделиран в работно хале с размери от 30 m дължина, широчина от 7,5 m и височина 6 m, (фиг. 78 и фиг. 79).



Фигура 78. Моделиран експериментален тунел



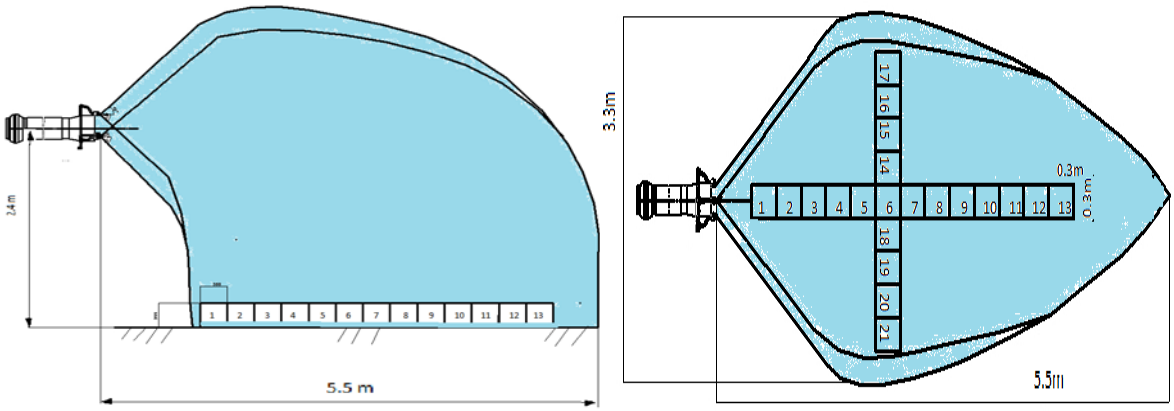
Фигура 79. Схема на моделирания тунел и стационарна пожарогасителна система

При проведените експерименти със стационарна пожарогасителна система за хоризонтално разпръскване, работата на дюзите съответства зададените производствени характеристики и модели. Както е показано на фиг. 83, най-интензивното намокряне на настилката се наблюдава на разстояние от 1,0 до 4,0 m с обхват приблизително 3,0 m в диаметър.



Фигура 83. Разпръскване и омокряща способност на дюза GW M5

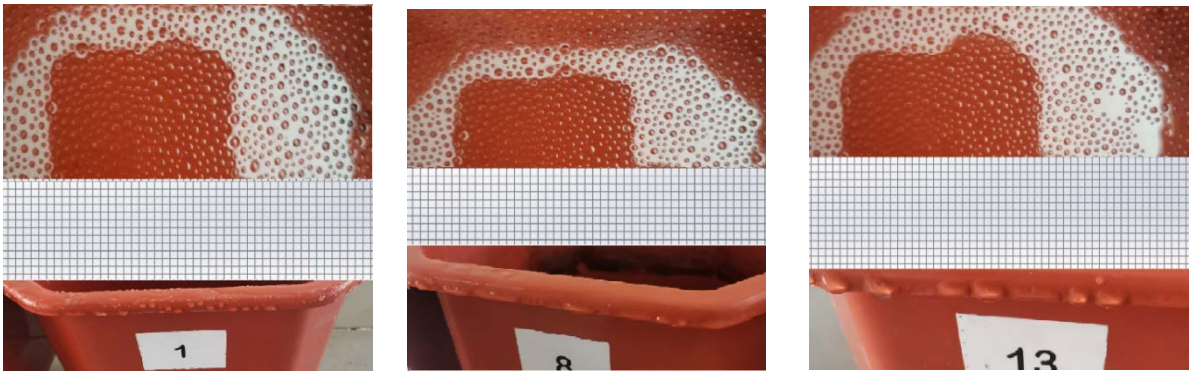
На фигура 85 графично е показано разположението на съдовете с течност и покритието от разпръснатата водна мъгла от системата.



Фигура 85. Графика – сечения на водния поток и съдовете за суспендираща течност – вертикално и хоризонтално

Изследвания и резултати при хоризонтално разпръскване

След преустановяване работата на пожарогасителната система е извършено изследване на съдовете със суспендираща течност (омаслител). Установено е, че попадналите капки са с ясно очертани контури и добре запазени размери (фиг. 87). С помощта на милиметрова хартия са определени приблизителните размери и броят на капките.



Фигура 87. Съдове със суспендираща течност, милиметрова хартия и регистрирани капки

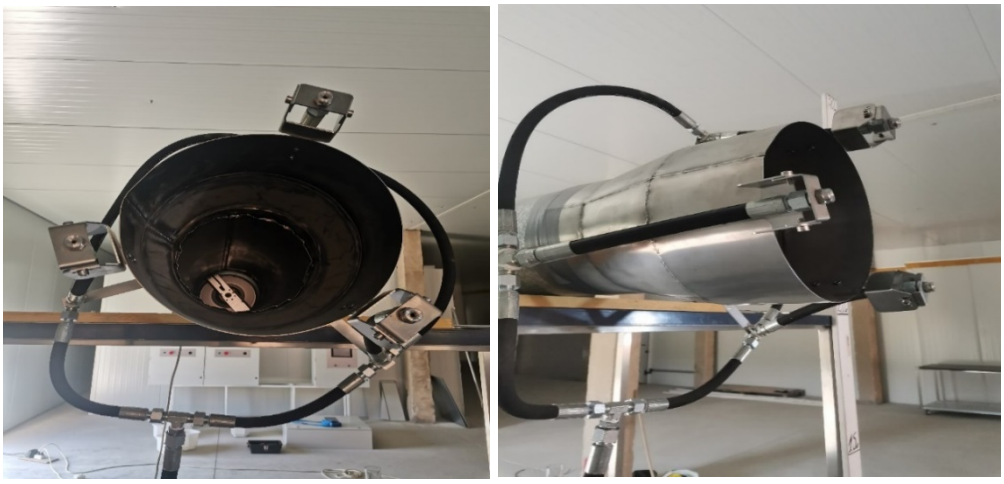
Взета е подбрана извадка на съдове със суспендираща течност от конфигурацията, показана на фиг. 85, разположени по посока на разпръскване. В тях са запазени размерите на попадналите капки, което позволява определяне на техния брой и размер на различни разстояния по посока на действие на дюзите. Разположението на съдовете е подбрано така, че да осигури реална представа за разпределението на капките както по дължина, така и по широчина на разпръскване на водната мъгла.

В съд № 1, разположен на разстояние 1,0 m е установено, че капките с диаметър до 500 μm съставляват около 58–60 %, тези с диаметър до 1000 μm – около 30–35 %, а капките с диаметър над 1000 μm – около 5–7 % от общия брой (фиг. 87).

Таблица 31. Параметри на дюзи DCU модел 1940 PNR

Ъгъл	DAU	DBU	DCU	DDU	Код	D mm	D1 mm	Капацитет - lpm						
								Налягане –bar						
								0,7	1,0	2,0	3,0	5,0	7,0	10
90°	•				**1118 xx**	1,2	0,8	0,57	0,68	0,96	1,18	1,52	1,80	2,15
	•				**1147 xx**	1,3	1,0	0,71	0,85	1,20	1,47	1,90	2,25	2,68
	•	•			**1188 xx**	1,4	1,2	0,91	1,09	1,54	1,88	2,43	2,87	3,43
	•	•			**1212 xx**	1,5	1,2	1,02	1,22	1,73	2,12	2,74	3,24	3,87
	•	•	•		**1235 xx**	1,6	1,3	1,14	1,36	1,92	2,35	3,03	3,59	4,29
	•	•	•		**1294 xx**	1,8	1,3	1,42	1,70	2,40	2,94	3,80	4,49	5,37
	•	•	•		**1370 xx**	2,0	1,4	1,79	2,14	3,02	3,70	4,78	5,65	6,76
		•	•		**1470 xx**	2,3	1,8	2,27	2,71	3,84	4,70	6,07	7,18	8,58
		•	•		**1588 xx**	2,6	1,8	2,84	3,39	4,80	5,88	7,59	8,98	10,7
		•	•		**1659 xx**	2,7	2,0	3,18	3,80	5,38	6,59	8,51	10,1	12,0
		•	•		**1740 xx**	2,9	2,0	3,57	4,27	6,04	7,40	9,55	11,3	13,5
		•	•		**1835 xx**	3,3	2,0	4,03	4,82	6,82	8,35	10,8	12,8	15,2
		•	•		**1940 xx**	3,3	2,4	4,54	5,43	7,68	9,40	12,1	14,4	17,2
		•	•		**2105 xx**	3,5	2,6	5,07	6,06	8,57	10,5	13,6	16,0	19,2
			•		**2117 xx**	3,7	2,7	5,65	6,75	9,55	11,7	15,1	17,9	21,4
			•	•	**2147 xx**	4,0	3,2	7,10	8,49	12,0	14,7	19,0	22,5	26,8
			•	•	**2164 xx**	4,1	3,2	7,92	9,5	13,4	16,4	21,2	25,1	29,9
			•	•	**2188 xx**	4,7	3,2	9,08	10,9	15,4	18,8	24,3	28,7	34,3
			•	•	**2235 xx**	5,2	3,8	11,4	13,6	19,2	23,5	30,3	35,9	42,9
				•	**2294 xx**	5,8	3,8	14,2	17,0	24,0	29,4	38,0	44,9	53,7
				•	**2370 xx**	6,4	3,8	17,9	21,4	30,2	37,0	47,8	56,5	67,6

Три дюзи DCU, модел 1940 PNR, са монтирани по контурната част на конуса на експерименталната уредба под ъгъл 120° и на височина 2,4 m от пода (фиг. 91). Монтажът е изпълнен в съответствие с изискванията за височина на поставяне, разстояния между дюзите и налягане на водата, посочени в таблица 31 (маркирано в жълто).



Фигура 91. Конус с монтирани дюзи DCU модел 1940 PNR

При проведените изследвания работата на дюзите DCU модел 1940 PNR при хоризонтално разпръскване със стационарна пожарогасителна система отговаря на зададените производствени характеристики и модели (фиг. 92). Най-интензивното намокряне на настилката се наблюдава на разстояние от 1,5 m до 4,5 m с диаметър около 3,0 m. В сравнение с дюза GW модел M5 (фиг. 83), експерименталните резултати показват, че намокрянето и покритието на DCU 1940 PNR са по-равномерни и по-плътни, което гарантира по-висока ефективност на дюзата.



Фигура 92. Разпръскване и омокряща способност на дюза DCU 1940 PNR

Системата е хидравлично оразмерена за да се гарантира, че водното налягане отговаря на препоръчителното налягане за всички дюзи в активираната зона. Изследванията продължават с разполагането на съдове с размер 300×300 mm, съдържащи суспендираща течност, в активната зона на хоризонтално разпръскване на водната мъгла. Тяхното предназначение е да улавят и запазват размера на попадналите капки водна мъгла (фиг. 93).



Фигура 93. Разположение на съдове за суспендираща течност в активната зона на пожарогасителната система

При тестването на дюзите DCU модел 1940 PNR водният поток на разпръснатата водна мъгла при хоризонтално разпръскване образува ясно очертана елипсовидна форма на покритие (фиг. 93 и 85). Увеличеният обсег спрямо зададените технически характеристики се дължи на ефективното действие на вентилатор СК 250 А, като намокрянето достига до 6,0 m за разлика от дюза GW модел М5, при която покритието е до 5,0 m.

В тестовата среда системата е активирана за разпръскване на водна мъгла при ниско налягане. Продължителността на разпръскване при дюзи DCU 1940 PNR е около 38–42 s, което съответства на времето за изразходване на 11 литра вода от резервоара. Това отговаря на техническите характеристики на производителя на дюзите, като при налягане 10 bar производственият разход е 17,2 ℓ/min (табл. 31).

В съд № 1 на разстояние 1,5 m по дължина на разпръскване на водната мъгла от разпръскващите дюзи е установено, че капки попаднали в суспендиращата течност (омаслител) с диаметър (D) до 500 μm, са в порядъка на около 58-60 %. Капките с диаметър (D) до 1000 μm, са в порядъка на около 30-35 %, а с диаметър (D) над

1000 μm, са в порядъка на около 3-5 % от общия брой попаднали и регистрирани капки.

III.2. Моделиране и гасене на проектен пожар със стационарна пожарогасителна система с водна мъгла при ниско налягане

В експерименталния тунел са проведени изпитвания на пожар на разлято течно гориво с цел оценка на ефективността на стационарна пожарогасителна система с водна мъгла под ниско налягане. Изпитана е система с дюзи GW, модел M5, при непроменено разположение на системата. За създаване на огнището е използвана алуминиева тава с диаметър 600 mm и височина 130 mm (фиг. 96).

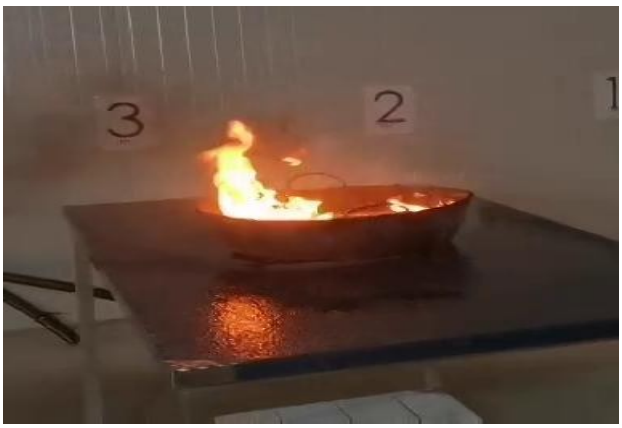


Фигура 96. Тава за горима течност

По време на подготовката на проектния пожар тавата е напълнена с 5 литра вода и 1 литър бензин, формирайки източник на запалване с мощност около 200 kW. След около 20 s от запалването, необходими за развитие на пожара (фиг. 97), се задейства пожарогасителната система. Водната мъгла започва ефективно да потиска пожара (фиг. 98), като ограничава неговата мощност и не му позволява да достигне максимални стойности. Освен това, мъглата улавя отделените сажди и ги отвежда към пода, като същевременно нивото на задимяване остава ниско.



Фигура 97. Развитие на пожара



Фигура 98. Потискане на пожара

В изпитвателната уредба със съд за флуид от 11 литра водата се изчерпва за около 42–45 s. За това време не е възможно да се загаси пожар с такава мощност, тъй като целта на теста е да се оцени ефикасността на системата за задържане на развитието на пожара на ниски нива.

За продължителна работа в реални условия е необходимо оразмеряване на водния запас според проектния пожар, необходимия дебит и изискваната продължителност на действие. В разглеждания проект се приема продължителност около 60 минути; достатъчността ѝ трябва да се оценява спрямо конкретния сценарий и времето за реакция на аварийните служби.

Допълнително са проведени тестове с монтирани дюзи DCU модел 1940 PNR. Местоположението на системата е непроменено, както при предходните изпитвания. За огъня се използва алуминиева тава с диаметър 600 mm и височина 130 mm, напълнена с 5 литра вода и 0,5 литра бензин, формираща източник на запалване с мощност около 100 kW. След запалване се изчакват 20 s за развитие на пожара (фиг. 99), след което се задейства системата с водна мъгла при ниско налягане.

Водната мъгла ефективно потиска развитието на пожара (фиг. 100 и 101), задържайки го на ниски нива и не позволявайки да достигне максимална мощност. Освен това, мъглата улавя отделените сажди и ги отвежда към пода, поддържайки нивото на задимяване ниско. На фиг. 102 се показва пълното гасене на пожара от стационарната система с водна мъгла при ниско налягане.



Фигура 99. Развитие на пожара



Фигура 100. Потискане на пожара



Фигура 101. Овладяване на пожара



Фигура 102. Гасене на пожара

III.3. Основни изводи и препоръчвани параметри

С използването на разработената експериментална уредба, включваща резервоар с обем 11 l работен флуид (вода), който се изчерпва за приблизително 38–42 s, е установено, че генерираната водна мъгла чрез дюзи тип GW модел M5 и DCU модел 1940 PNR, благодарение на достатъчната площ на покритие, не само потиска пожара, но и ефективно го овладява като ограничава неговото развитие. В

някои случаи е постигнато и пълно гасене на възникналия пожар (фиг. 102), което доказва ефективността на системата както за задържане развитието на пожара на ниски нива, така и в зависимост от неговата мощност за постигане на окончателно гасене.

Резултатите от проведените експериментални изследвания показват, че разпределението на капките по размер (Dp), генерирани от дюзите GW модел M5 и DCU модел 1940 PNR, отговаря на изискванията на стандарт EN 14972. При изследваните модели на стационарни пожарогасителни системи с водна мъгла с ниско налягане се установява, че използването на вентилатор тип СК 250 А води до увеличаване на периметъра на покритие. Това се дължи на повишената скорост на капките, което позволява по-дълъг път на движение преди утаяване и съответно осигурява по-висока ефективност на защита при възникване на пожари в затворени пространства, като работни помещения, пътни и кабелни тунели.

Сравнителният анализ на двата типа дюзи показва, че дюзата DCU модел 1940 PNR, генерира водна мъгла с по-малки диаметри на капките и осигурява по-плътно покритие на защитаваната зона при проектно работно налягане от 10 bar. Капките с диаметър до 500 μm, генерирани от този тип дюза, са значително повече в сравнение с тези, произведени от дюза GW модел M5, което допринася за по-високата ефективност на процеса на гасене.

Експериментално е установено, че при пожари с по-висока мощност системата ограничава тяхното развитие и не допуска достигане на максимален интензитет по време на работа. При пожари с по-ниска мощност се наблюдава не само ограничаване, но и пълно гасене на огнището.

ГЛАВА IV. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФИЗИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ПОЖАРОГАСИТЕЛНИ СИСТЕМИ С ВОДНА МЪГЛА

IV.1. Разработване на физически модел на пожарогасителни системи с водна мъгла

Не съществува универсален оптимален размер на капките при водната мъгла. Ефективността на пожарогасенето зависи от комплекс от параметри, включително разпределението на размерите на капките, дебита на водата, разположението и броя на дюзите, както и съответствието на системата с конкретните условия на защитавания обект.

Класификацията на водната мъгла е необходима и полезна при избора на системи за пожарогасене в помещения, в които обектите на защита са стационарни, адекватно конструирани и които могат да бъдат затворени при възникване на пожар. В пътните тунели, обаче нито едно от тези условия не е изпълнено. Пожар може да възникне във всяка тръба и по цялата ѝ дължина, при участие на различни видове превозни средства и горими товари.

При възникване на пожар може да се приеме, че началната му площ съответства на габаритните размери на превозното средство, които варират в широки граници: дължина – от 6 до 16,5 m, широчина – от 1,80 до 2,60 m и височина – от 2 до 4 m.

Подаването на въздух в тунела се осъществява в два основни режима:

- нормално проветряване, в зависимост от интензивността на трафика преди възникване на пожар;
- аварийно проветряване — след откриване на пожара, с цел осигуряване на условия за евакуация на хората и подпомагане на пожарогасителните действия.

Очевидно е, че вентилационните условия представляват допълнителен неопределен, но съществен фактор при развитието на пожара. С оглед на тези неопределености и на класификацията на водната мъгла може да се приеме, че системите за потискане на пожари в пътни тунели следва да осигуряват преобладаващо количество капки от клас 1 и клас 2, както и ограничено количество капки от клас 3.

Влиянието на вентилацията върху разпространението (разстоянието на пренос) на капките водна мъгла представлява основен аспект при изследването на тези системи. Това е особено важно предвид линейния характер на тунелите, разположението на струйните вентилатори и разстоянията между напречните евакуационни галерии. Най-голям ефект от водната мъгла се постига, когато капките попадат в зони, в които могат ефективно да се изпаряват. При късно активиране на системата е необходима по-голяма зона на разпространение, за да се осигури охлаждане на вече нагретите повърхности.

Проектирането на системи за противопожарна защита в пътни тунели е динамично развиваща се област, като числените модели все по-често се използват като усъвършенстван инструмент за изследвания на варианти и оптимизация на решенията.

Анализът на разпространението на капките водна мъгла с ниско налягане дава основание да се предложи съвременен подход за изследване и проектиране на системи за пожарна защита в пътни тунели.

IV.2. Експериментални изследвания и обработка на резултатите

Разстоянието по дължината на тунела, до което достига разпръснатата вода, е основен показател за взаимодействието ѝ с основния въздушно-газов поток.

Разработеният физико-математичен двуфлуиден модел вода–въздух (газ), при който всяка от фазите се разглежда със собствени характеристики като скорост, плътност и температура представлява приближено решение. Получените резултати са анализирани чрез съпоставителен анализ с експериментални данни, което позволява оценка на адекватността на модела.

Използвани означения:

m_p - *маса на течната фаза*, kg;

$\overrightarrow{V_p}(x,y)$ - *скорост на течната фаза*, m/s;

C_R - *коефициент на аеродинамично съпротивление*;

$\overrightarrow{V_g}(x,y)$ - *скорост на въздушното газово течение*, m/s;

$Re_p = \frac{D_p V_r}{\nu}$ критерий на Рейнолдс;

$\overrightarrow{V_r} = \overrightarrow{V_g} - \overrightarrow{V_p}$ - релативна скорост, m/s;

Основна идея при разглеждане на течения на една среда в друга е използването на т.нар. двуфлуиден модел „Приложна механика на флуидите“ (Антонов, 2009, 2016). При него всяка една от фазите се разглежда със собствена скорост, плътност и температура. Решава се с използване на известните от механиката на флуидите методи – по Лагранж (субстанционен метод) или по Ойлер (локален метод). Двете фази представляват отделна флуидна среда, описват се с едни и същи системи диференциални уравнения, като връзката между тях са силите на междуфазово взаимодействие. Параметрите на двете фази се записват в уравненията с долни индекси на въздушната (газовата) среда, приета за носеща с „g“, а за примесите в случая капките с „p“.

Междуфазово взаимодействие се осъществява от следните сили:

- масова сила - $m_p \vec{g} = \vec{f}_m$;
- сила от аеродинамично съпротивление - $\vec{f}_A = 0,5 C_R s \rho_g \left(\vec{v}_r\right) \vec{v}_v$, където

$$C_R = f\left(\mathrm{Re}_p\right), \quad \mathrm{Re}_p = \frac{D_p v_r}{\nu};$$

където: C_R е коефициентът на съпротивление;

s - миделевото сечение на капката, m²;

ρ_g - плътността на газа, kg/m³;

v_r - относителната скорост на капката спрямо газа, m/s; v_r - нейният модул, m/s;

Re_p е числото на Рейнолдс на капката;

D_p - диаметърът на капката, m;

ν - кинематичният вискозитет на газа, m²/s. Знакът на проекциите на силата се определя спрямо относителната скорост.

- миделево сечение (най-голямото сечение на капката по направление на движението) – s, при приета приблизително сферична форма $s = \frac{\pi D_p^2}{4}$;
- сила на Сафман - $f_s = C_s \sqrt{\frac{\rho_g}{\mu}} \left(\frac{D_p}{2}\right)^2 \sqrt{\frac{\partial u_g}{\partial y}}$.

μ - динамичният вискозитет на газа, Pas;

u_g - надлъжната скорост на газа, m/s;

y - напречната координата, m; ∂ug/∂y е напречният градиент на скоростта, s^{-1}.

Силата на Сафман се описва с израза:

$$f_s = C_s\sqrt{\frac{\rho_g}{\mu}}.\left(\frac{D_p}{2}\right)^2\sqrt{\frac{\partial u_g}{\partial y}}\,, \quad \text{в който } C_s = 6,46\,.$$

(IV.1)

Моделът е двумерен. Компонентите на скоростта са само по x и y. В напречното направление тя се приема като постоянна.

При движение на капка в двуфазно течение се използва уравнението на Лагранж за постъпателно движение на единична частица. То има вида:

$$m_p\frac{d\overrightarrow{V_p}}{dt} = \sum_{i=1}^{n}\vec{f_i} \qquad \text{(IV.4)}$$

където $\vec{f_i}$ са силите на междуфазово взаимодействие, избрани по преценка за решавания конкретен случай.

В скаларен вид (IV.4) се записва както следва:

$$m_p\frac{du_p}{dt} = -0,5C_R.s.\rho_g\left(u_p-u_g\right)\sqrt{\left(u_p-u_g\right)^2+\left(V_p-V_g\right)^2} \qquad \text{(IV.5)}$$

$$m_p\frac{dV_p}{dt} = \pm m_p g - 0,5C_R.s.\rho_g\left(V_p-V_g\right)\sqrt{\left(u_p-u_g\right)^2+\left(V_p-V_g\right)^2} \pm f_s \qquad \text{(IV.6)}$$

Уравненията (IV.5) и (IV.6) се интегрират при следните гранични условия:

$$t = 0,\ x = y = 0,\ u_g = u_{g_0},\ V_p = V_{p_0},\ u_{y_0} = \text{const},\ V_g = 0\,. \qquad \text{(IV.7)}$$

При прието съгласно (IV.7) условие $V_g = 0$ и $u_g = \text{const}$, уравнения (IV.5) и (IV.6) могат да се запишат във вида:

$$m_p\frac{du_p}{dt} = -0,5C_R.s.\rho_g\left(u_p-u_g\right)\sqrt{\left(u_p-u_g\right)^2+V_p^2} \qquad \text{(IV.10)}$$

$$m_p\frac{dV_p}{dt} = \pm m_p g - 0,5C_R.s.\rho_g V_p\sqrt{\left(u_p-u_g\right)^2+V_p{}^2} \qquad \text{(IV.11)}$$

Замества се $\left(u_p-u_g\right)$ с u_p^*

$$m_p\frac{du_p}{dt} = -0,5C_R.s.\rho_g u_p^*\sqrt{u_p^{*2}+V_p^2} \qquad \text{(IV.12)}$$

$$m_p\frac{dV_p}{dt} = \pm m_p g - 0,5C_R.s.\rho_g V_p\sqrt{u_p^{*2}+V_p{}^2} \qquad \text{(IV.13)}$$

Граничните условия на (IV.12) и (IV.13) са аналогични на (IV.7).

$$t = 0,\ x = y = 0,\ u_g = u_{g_0} = \text{const},\ V_p = V_{p_0} = 0,\ V_g = 0,\ u_p^* = u_p - u_{g_0} \qquad \text{(IV.14)}$$

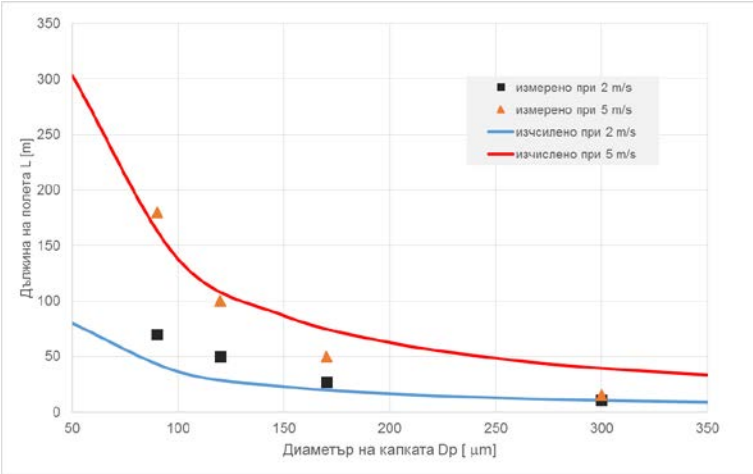
Знакът пред масовата сила в лявата страна на (IV.13) се определя от ориентацията на координатната система и винаги е насочена вертикално надолу.

Числено решение

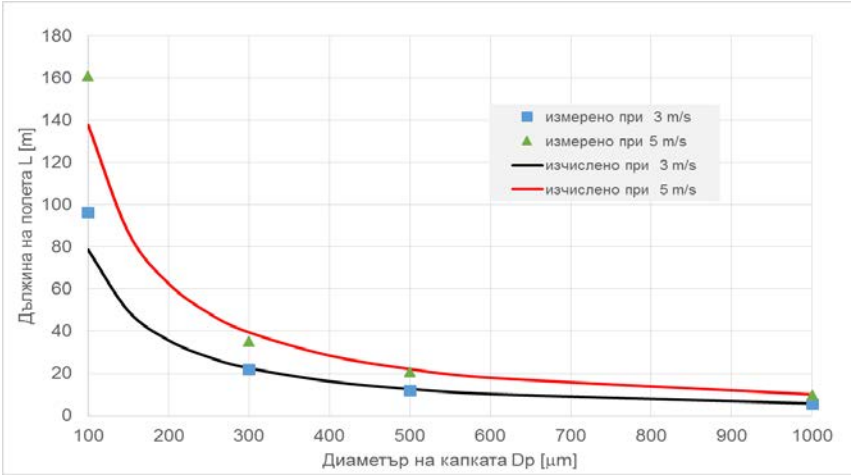
Системата уравнения (IV.12–IV.13) се решава числено с прилагане на метода на крайните разлики. Граничните и начални условия (IV.7) формират първоначалните стойности на търсените величини:

$$u_p^{(0)} = 0;\ v_p^{(0)} = v_{дюза},$$

С представения числен модел за определяне на траекторията на разпръсната капка от инсталация с водна мъгла може да се моделират различни варианти за размери на капките (от 100 до 1000 μm) и при различна скорост на основното (въздушното) течение. Точността на получените резултати представени на фиг. 109 и фиг. 110 е сравнена с експериментални данни, публикувани в (Rein и др., 2009; Crosfield и др., 2009; Hua и др., 2002). При скорост на въздушното течение 2 m/s (фиг. 109), максималната относителна грешка е 11 %.

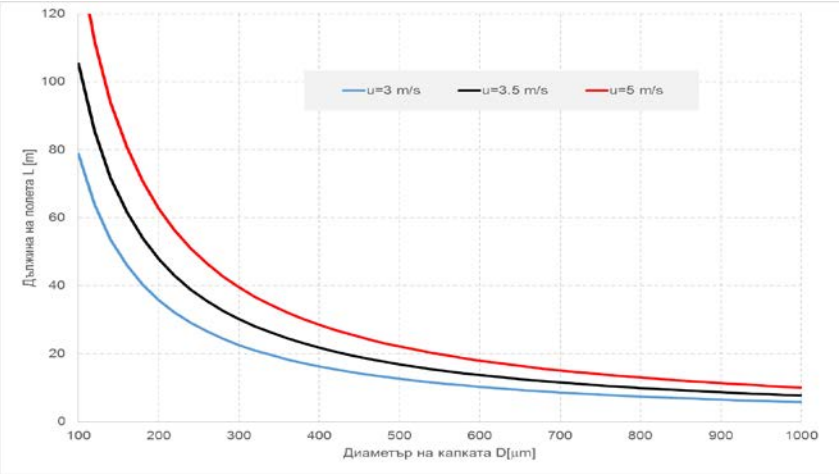


Фигура 109. Сравнение на експериментални данни от (Rein и др., 2009) с резултати от числения модел

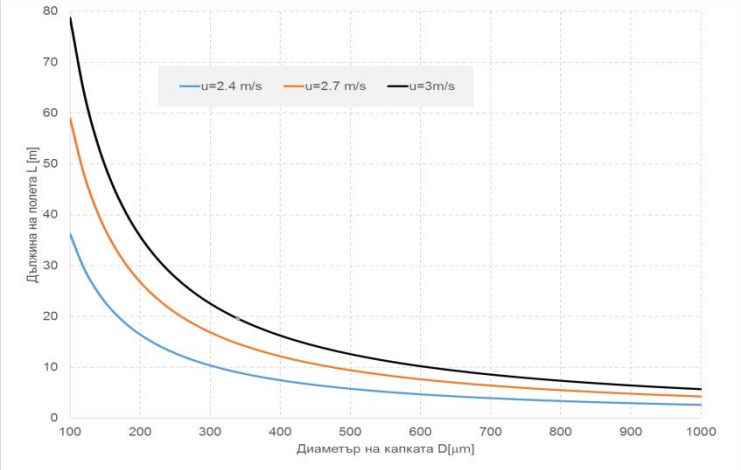


Фигура 110. Сравнение на експериментални данни от (Crosfield и др., 2009) с резултати от числения модел

На фиг. 111 и 112 са показани резултатите от моделирането, получени за хоризонтален участък от тунел със скорост на изтичане на водата от дюзата Vp=10 m/s, височина на изтичане y=6 m над пътното платно. Резултатите от моделирането показват задоволително съвпадение с данните от опита. Това дава основание за построяване на графичните зависимости, построени в границите на необходимата скорост до евакуация на пътниците фиг. 111 и при последващото пряко гасене фиг. 112.



Фигура 111. Необходимата скорост на изтичане на водата от дюзата над пътното платно до евакуация на пътниците



Фигура 112. Необходимата скорост на изтичане на водата от дюзата над пътното платно при последващото пряко гасене

IV.3. Параметричен анализ на модела за взаимодействие на водна мъгла и вентилация при пожар в пътни тунели

Въз основа на извършените експериментални изследвания е разработен модел на разпространение на капките на водна мъгла в проветряван пътен тунел. Сравнителният анализ на проведените експериментални изследвания от други автори показва, че моделът дава достоверни резултати и с достатъчна за численото моделиране отдалеченост на полета на капките до падането им върху пътната настилка. Разработеният модел позволява проектиране на системи за водна мъгла, функциониращи съвместно с вентилационни системи, като по този начин се създават условия за оптимизиране на тяхното взаимодействие. Получените резултати могат да бъдат използвани като основа за прилагане на интегриран подход при проектирането на конкретни системи.

Настоящото изследване следва да бъде доразвито чрез анализ на взаимодействието на водната мъгла при възникване на пожар в пътен тунел. Ранното откриване на пожара е от съществено значение, тъй като трябва да осигури своевременното активиране на водната мъгла с цел ограничаване на разпространението на пожара и намаляване на неговата топлинна мощност.

Размерите и площта на превозните средства, които могат да бъдат обект на пожаропотискане и гасене с водна мъгла в пътен тунел, са представени в табл. 34. В

зависимост от положението на превозното средство, което е източник на пожар, към момента на откриването му е необходимо да бъдат задействани поне две съседни инсталации.

Таблица 34. Превозни средства обект на въздействие с водна мъгла

Превозно средство	Габаритни размери, [m]			Хоризонтална площ, **S** [m²]
	Дължина, **(L)**	Широчина, (**W**)	Височина, (**H**)	
Лек автомобил	6,0	1,80	2,0	10.8
Ван	6,0	2,35	2,45	14.1
Камион (до 20 t)	13,6	2,45	2,45	33.3
Автобус	13,7	2,55	3,3	34.9
Камион (до 40 t)	16,5	2,60	4,0	42.9
Пожарна цистерна 12 m³	9,76	2,50	3,41	24,4

IV.4. Методика за създаване на модел на стационарна пожарогасителна система в тунел

Разработен е примерен модел на стационарна пожарогасителна система, предназначена за приложение в пътни тунели, въз основа на извършените експериментални изпитвания на дюза GW модел M5. В модела са изяснени основните принципи и изисквания, които следва да се отчитат при проектирането, изграждането и експлоатацията на стационарни пожарогасителни системи с дюзи за водна мъгла в пътнотранспортни тунели.

IV.4.1. Общи положения

Разглежданата система принадлежи към т.нар. системи за зонова защита. Дюзите за пожарогасене обичайно се монтират под тавана на тунела. При активиране в съответната защитена зона те разпръскват вода под формата на фина водна мъгла.

Целият тунел или отделни негови участъци се покриват от дюзи, разпределени в отделни секции. Всяка секция обхваща защитена зона с дължина от приблизително 25–30 m участък от тунела. Секциите са свързани чрез секционни клапани към главния пожарен водопровод и помпената станция. Главният пожарен водопровод е постоянно под налягане и запълнен с вода.

В случай на активиране на инсталация, автоматично от пожароизвестяването или ръчно, един секционен клапан се отваря и помпата автоматично се задейства чрез получените сигнали от системата за управление. Пожарното водоснабдяване трябва да осигури воден дебит при минимално налягане поне за две секции едновременно. Водоснабдяването трябва да е достатъчно за нормална работа на инсталацията:

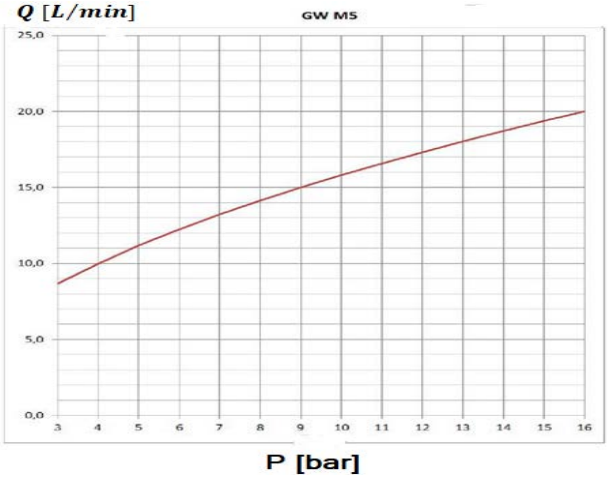
- минимум 30 минути за тунели с дължина на подземния част до 600 m;
- 40–60 минути за тунели с дължина над 600 m.

IV.4.2. Взаимодействие с други системи

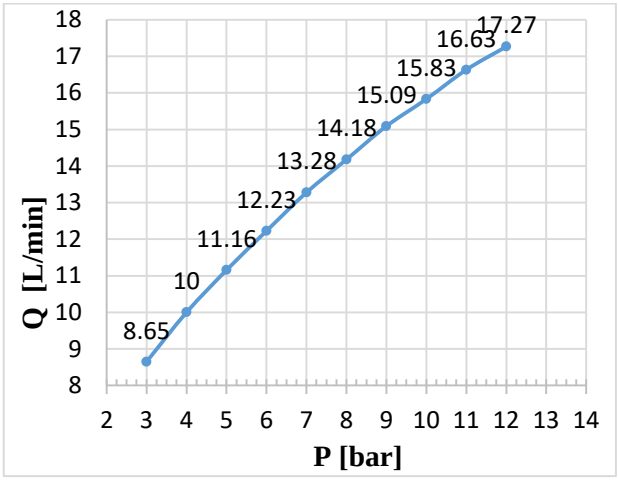
Вентилационните системи се проектират съобразно условията на нормална експлоатация, както и при аварийни режими, свързани с пожар. Неспазването на проектно заложените аварийни режими на вентилацията може да доведе до значително намаляване на ефективността на системите за пожарна безопасност.

IV.4.3. Хидравлично оразмеряване

По отношение на хидравличното оразмеряване на системата са съпоставени производствените характеристики на производителя на дюзите за водна мъгла GW M5 (фиг. 113) и постигнатите измерени разходни показатели при проведените тестове (фиг. 114), характеризиращи надежността и ефективността на проектната система.



Фигура 113. Разходни характеристики на дюзата според производителя

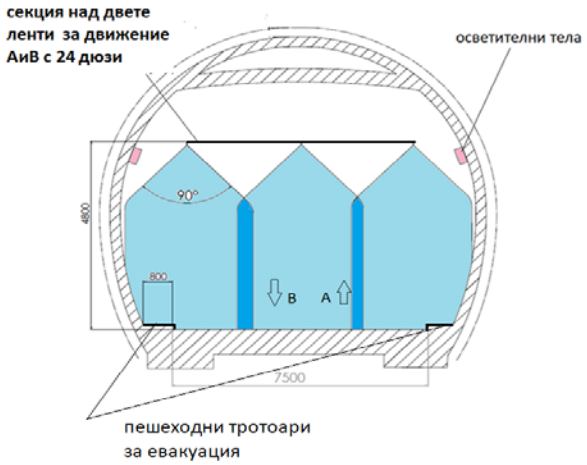


Фигура 114. Измерени разходни характеристики на дюза GW модел M5

IV.4.4. Проектно решение на стационарна пожарогасителна система

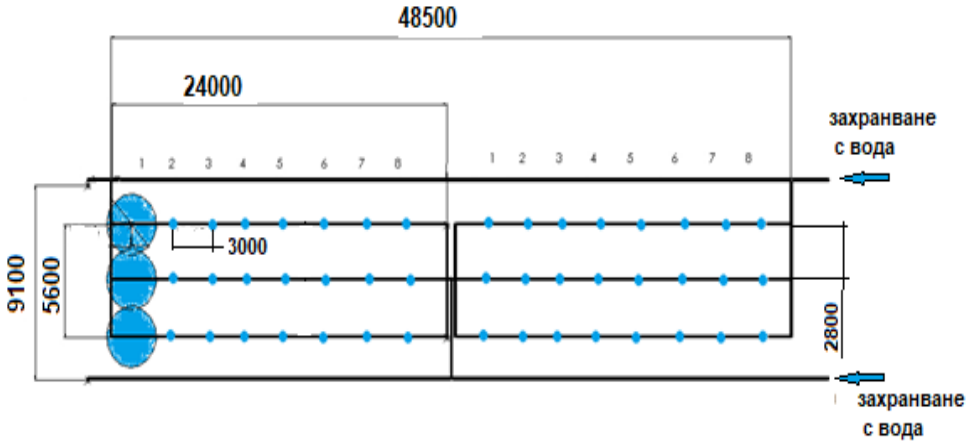
Проектното изпънение на пожарогасителната система определя разпределението на дюзите в тунела и последователността на монтажа. Проектното изпълнение се базира на иженерни методи, проведени тестове и реални условия в тунела. За проектния двупосочен тунел за движение с аварийни отбивки, се избира дължина 800 m.

На фигура 115 е показан напречен разрез на моделираното проектно изпълнение на стационарната пожарогасителна система за площно водно покритие на пътното платно с широчина от 7500 mm и височина на монтаж на 4800 mm от пътното платно на тунела, тоест от площта на водно покритие.



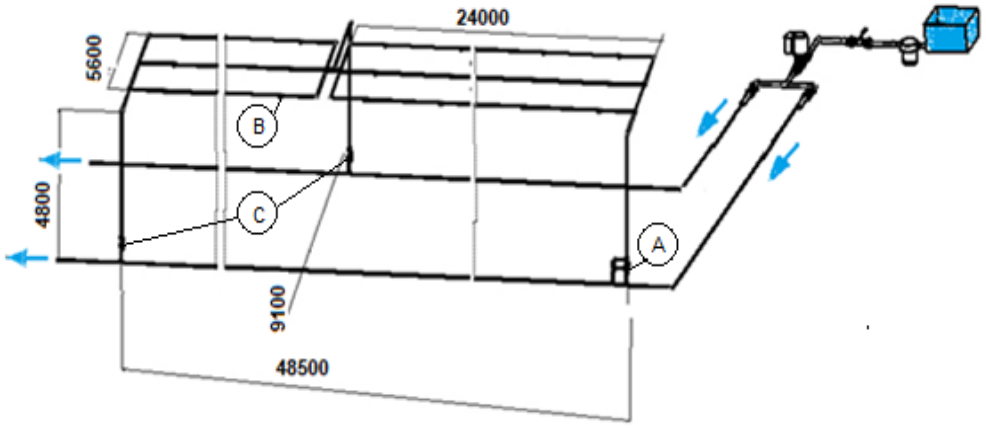
Фигура 115. Напречен разрез на тунела и сечение на разпръскващата вода покриваща платното за двупосочно движение

Проектирано е за всяка секция да се поставят успоредни три реда тръбна система с единична дължина на всеки ред от 24 000 mm, монтаж на 8 дюзи на ред през 3 000 mm и на 2 800 mm междуредово разположение на дюзите. Разстоянието между трите реда на секция е 5 600 mm, както и широчина на тунела, с платно за движение и тротоари за евакуация 9 100 mm (фиг. 116). На фигурата са представени две съседни секции с обща дължина 48 500 mm. В проектното решение е предвидено при необходимост от задействане на системата да се активират едновременно поне две съседни секции.



Фигура 116. Схема на моделираната секционирана пожарогасителна система

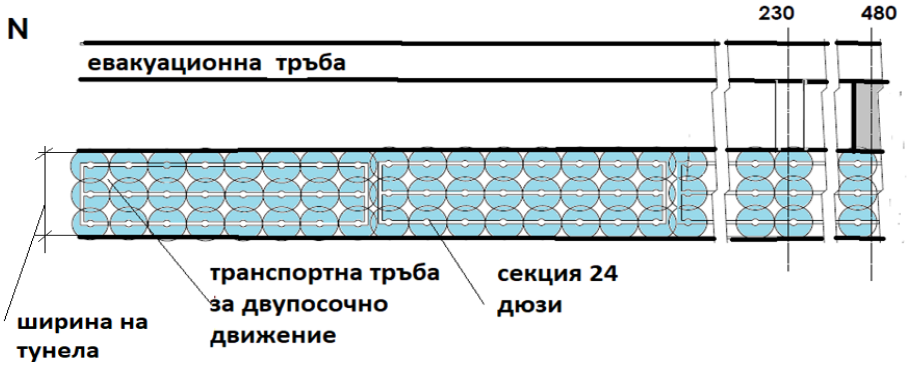
Стационарната пожарогасителна система се състои основно от помпена станция за захранване с вода, тръбопроводна система, дюзи и секционни вентили. Следователно това е сравнително неусложнено устройство. На фигура 117 е представена проектната конфигурация и разположението на елементите на структурата на стационарна пожарогасителна система ниско налягане с водна мъгла в тунел с двупосочно движение, включваща също и проектните оразмерявания за защита на пътното платно.



Фигура 117. Схема на структурата на стационарна пожарогасителна система

На фигура 119 е представен изглед отгоре на двупосочен пътен тунел с монтирана стационарна пожарогасителна система. Илюстриран е участък, включващ две съседни секции, като са показани схемата на свързване, начинът на захранване на системата, както и зоните на площно покритие върху пътното платно.

Дължината на покриване на всяка секция е от порядъка на 25 m. При така изпълненото проектно решение се осигурява пълно покритие на пътното платно в рамките на защитавания участък.



Фигура 119. Схема на покритие на две секции на нивото на пътното платно за двупосочно движение в пътен тунел - изглед отгоре

IV.4.5. Видове и размери на превозните средства, преминаващи през тунели

Превозните средства, които могат да предизвикат или да бъдат засегнати от пожар, представляват съществен фактор при определяне на проектните характеристики на пожарогасителната система. Тя е оразмерена с цел осигуряване на плътно покритие на пътното платно в тунела и осигуряване на безопасна експлоатация при нейното активиране.

IV.4.6. Монтаж и въвеждане в експлоатация на стационарна пожарогасителна система

Монтажът се извършва в съответствие с изискванията на производителя GW Sprinkler и проектната документация. Както и повечето производители, препоръчва използването на неръждаема стомана за тръбите на системата, което е и направено при тестовете. Опората на тръбата на дюзата е проектирана така, че да издържа на вибрации и движение, които могат да възникнат при експлоатация на съоръжението. Тръбните системи с дюзи са проектирани така, че монтажът на дюзите да не създава риск от повреда както на тръбопроводната система, така и на самите дюзи.

Дюзите се монтират след окончателното изграждане и надеждното закрепване на тръбопроводната система, промиването на вътрешните ѝ канали за отстраняване на замърсяванията и последващото им продухване със сгъстен въздух за отстраняване на остатъчната вода. Сгъстеният въздух се използва само при подготовката на тръбопровода, а не за разпрашаване на водата при работа на дюзите. След монтажа защитните капачки се оставят на място за предпазване на дюзите от механични повреди и замърсяване, съгласно указанията на производителя.

Затягането на дюзите към вътрешната резба на тръбната система се извършва с контролиращ въртящ момент от 4 Nm ± 1 Nm. Отклонение на щифта на дефлектора извън централната ос на отвора или неправилното му позициониране води до неравномерно разпределение на водната струя и влошаване на работните характеристики.

IV.4.7. Активиране и работа на системата

За целия период на развитие на пожар в пътен тунел операторът и спасителните служби следва да осигуряват едновременно автоматичен и ръчен контрол по секции на пожарогасителната система с цел определяне и прилагане на най-ефективните стратегии за евакуация и защита на човешкия живот.

В зависимост от наличието на обучен персонал, очакваните рискове, типа на системата, използваните средства за управление и действащата нормативна уредба, тези изисквания предполагат системата за водна мъгла да бъде управлявана чрез дистанционно задействани управляващи елементи, а не чрез термочувствителни (самоактивиращи се) устройства, които не осигуряват възможност за визуален контрол и оперативна намеса.

Системата за водна мъгла следва да се управлява по секционен принцип. С цел оптимизиране на ефективността, дължината на отделните защитни участъци трябва да бъде ограничена до зони с достатъчно високи температури, при които се осигурява ефективно изпарение на водните капки, като се отчита възможната неопределеност в локализацията на пожара.

Извън тези зони ефективността на водната мъгла значително намалява, тъй като капките не достигат условия за пълно изпарение и съответно не реализират необходимия охлаждащ и инхибиращ ефект.

IV.4.8. Поддръжка на компонентите на стационарна пожарогасителна система

Въз основа на емпиричните данни, практиката и посочените по-горе стандарти, могат да бъдат обобщени интервалите за поддръжка на стационарни пожарогасителни системи в тунели (табл. 41).

Таблица 41. Интервали за поддръжка (преглед) на основните компоненти на Помпена станция

Компонент/ интервал	Месечно	Тримесечно	Годишно
Помпена станция	X		
Тръбопроводи			X
Дюзи			X
Ел. клапани		X	

Месечните дейности по поддръжката по правило се извършват от оперативния персонал. Системите следва да бъдат проектирани така, че тези дейности да могат да се изпълняват и от обучен, но не непременно висококвалифициран персонал. От друга страна, годишните дейности по поддръжка трябва да се възлагат на оторизирани специализирани фирми или на изпълнителя по монтажа на системата.

ГЛАВА V. ОСНОВНИ ИЗВОДИ, НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

V.1. Основни изводи

Проведените изследвания показват възможност за генериране на фини водни капки при ниско налягане и за потискане на моделни пожари в изследваната експериментална конфигурация. Охлаждащият ефект е свързан с нагряването и изпаряването на водата. Степента на намаляване на водния разход спрямо други системи следва да се определя при съпоставими пожарни сценарии и условия на изпитване.

Водната мъгла въздейства чрез охлаждане, локално понижаване на концентрацията на кислород вследствие на парообразуването и ограничаване на лъчистия топлообмен. Относителният принос на тези механизми зависи от размера и скоростта на капките, вида на горивото и вентилационните условия.

В зависимост от проектните цели действието на системите с водна мъгла може да се разглежда в следните направления:

1) Гасене на пожара – прекратяване на горенето при условията, за които системата е проектирана и изпитана.

2) Потискане на пожара – намаляване на топлинната мощност и интензивността на горенето.

3) Контрол на пожара – ограничаване на разрастването му и на топлинното въздействие върху съседни материали и конструктивни елементи.

Ефективността на системата с водна мъгла зависи от конструкцията на дюзите, работното налягане, водния разход и условията на приложение. Изследваните системи при ниско налягане представляват възможно решение за разглежданите видове тунели. Изборът им следва да се основава на резултати от изпитвания, анализ на пожарния риск и техническо-икономическа оценка.

Проектирането на системи с водна мъгла при ниско налягане трябва да се основава на изпитвания по представителни пожарни сценарии и на приложимите стандарти. Съответствието и одобренията се отнасят до конкретната система, нейната конфигурация и условията на приложение; те не следва да се приемат като общо потвърждение за всички възможни пожарни рискове.

V.2. Научни и научно-приложни приноси

В дисертационния труд са представени следните **научни приноси**:

1. Изследвани са дюзи за ниско налягане с цел подходящо разпределение на капките по площ и размер при гасене на пожари в пътни тунели. Изследвана е интензивността на оросяване върху експерименталната площ при различни радиуси на разполагане на измервателните съдове.

2. Установени са разпределението на водата и размерите на капките в изследваната конфигурация. Наблюдаваното отлагане на димни частици е основание за допълнително изследване на влиянието на системата върху видимостта.

3. Съпоставянето на дюзите GW M5 и DCU 1940 PNR показва, че при изследваните условия DCU 1940 PNR осигурява по-благоприятно разпределение на интензивността на оросяване и на размера на капките. Изводът се отнася до конкретната експериментална конфигурация.

Научно-приложни приноси се изразяват в:

1. Проектиран и изработен е стенд за изследване на дюзи при вертикално и хоризонтално разпръскване, който позволява да се изследва разпределението на капките върху различно ориентирани повърхности.

2. Проектиран и изработен е конус от неръждаема стомана с ъгъл 11°. По контура му са разположени държачи за дюзи през 120°, с възможност за регулиране на насочването от 0° до 90° спрямо посоката на въздушния поток.

Приносите с икономическа и практическа насоченост са:

1. Автоматичното активиране на системата компенсира по-дългото време за пристигане на пожарната и позволява на пожарникарите да се приближат до зоната на горене за ефективно гасене, което води до значителни спестени разходи.

2. Инсталирането на системи с водна мъгла при ниско налягане може да се извършва в периоди с най-малък трафик и не изисква затваряне на тръбата на тунела през деня.

3. Разходите за инсталиране се възстановяват през експлоатационния живот на системите, ако през това време настъпи поне един голям или много голям пожар. Моментът на такова събитие не може да се предвиди, но статистиката на ASFINAG (ILF, 2013) показва, че то е много вероятно. Ползата от намаляване на загубите е най-голяма при тежките пожари: 42% от нея се отнасят към катастрофалните пожари, 29% към много големите и 27% към големите, или общо 98% към тези три категории. Малките пожари дават само 2% от ползата. Икономическата целесъобразност трябва да се проверява за всеки тунел поотделно, като се отчитат местоположението и дължината му, делът на тежкотоварните превозни средства, наклоните пред и в тунела и честотата на трафика.

4. Като насока за отношението ползи/разходи са използвани данни от други страни. Според Fathi Tarada (2009) средната стойност за условията в Обединеното кралство е 1,27, която се приема като минимална за българските условия.

V.3. Допълнителни изводи за приложението на системи с водна мъгла при ниско налягане:

1. Изследвани са различни стационарни пожарогасителни системи за безопасност в инженерни съоръжения, енергийни и минни обекти и тунели. Доказана е целесъобразността и ефективността на стационарните системи с водна мъгла.

2. Стационарните системи подобряват условията за самоспасяване. Потискането на топлоотделянето позволява на спасителните екипи да се приближат до огнището. Потокът от мъгла от дюзите защитава пожарникарите от инфрачервената топлина на пламъка, каквато защита повечето технологии за гасене не осигуряват.

3. Ограничаването на топлинната мощност на пожара намалява топлинното въздействие върху конструкцията на тунела. С включването на две съседни инсталации в зоната на пожара се предотвратява разпространението на горенето към съседни превозни средства.

4. Охлаждащият ефект зависи от началната температура на водата, степента на изпаряване и крайната температура на парата. При нагряване на около 1 kg вода от 20 °C до 100 °C и пълното ѝ изпаряване се отнема около 2,6 MJ топлина.

5. Изследвани са основните елементи, дюзите за инсталации с ниско налягане, и са моделирани гасене на симулиран пожар и работата на системата. Предложени са модел и схеми на стационарна система с водна мъгла при ниско налягане. Формирана е база данни с основни параметри за целите на проектирането. Дадени са основните дейности по използване и поддръжка на този тип системи.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Михайлов М., Стойков Вл. Разпространение на водна мъгла в проветряван пътен тунел, ISSN 0861-5713 сп. Минно дело и геология. Година LXXVII. Книга 1-2/2023. Стр. 48-56

2. Михайлов М., Стойков Вл. Моделиране на стационарни пожарогасителни инсталации с дюзи за водна мъгла с ниско налягане, ISSN 0861-5713 сп. Минно дело и геология. Година LXXVII. Книга 3-4/2023. Стр. 50-62

3. Михайлов М., Стойков Вл. Моделиране на стационарни пожарогасителни инсталации за водна мъгла ниско налягане с хоризонтално разпръскване, ISSN 0861-5713 сп. Минно дело и геология. Година LXXVII. Книга 9/2023. Стр. 54-63

4. Михайлов М., Стойков Вл. Моделиране на стационарни пожарогасителни инсталации за водна мъгла ниско налягане с хоризонтално разпръскване, ISSN 0861-5713 сп. Минно дело и геология. Година LXXVII. Книга 10/2023. Стр. 56-63.

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов, И. С. (2009). Приложна механика на флуидите. ТУ, София. 280 с., ISBN 978-954-438-760-0.

2. Антонов, И. С. (2016). Приложна механика на флуидите. 2 прераб. и доп. изд., ТУ, София. 311 с., ISBN 978-619-167-230-1.

3. Български институт за стандартизация (БИС) (2021). БДС EN 14972-1:2021. Fixed firefighting systems – Water mist systems – Part 1: Design, installation, inspection and maintenance. https://bds-bg.org/bg/project/show/bds:proj:103960

4. Европейски парламент и Съвет (2004). Директива 2004/54/ЕО от 29 април 2004 година относно минималните изисквания за безопасност за тунелите в трансевропейската пътна мрежа. Официален вестник на Европейския съюз. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/54/oj

5. Министерство на регионалното развитие и благоустройството (МРРБ) (2015). Наредба № РД-02-20-2 от 21 декември 2015 г. за техническите правила и норми за проектиране на пътни тунели. Държавен вестник, бр. 8 от 29 януари 2016 г. https://www.mrrb.bg/bg/naredba-rd-02-20-2-ot-21-dekemvri-2015-g-za-tehnicheski-pravila-i-normi-za-proektirane-na-putni-tuneli/

6. Bergeson, W., Bilson, M., Connell, B., Melvin, B., McQuade-Jones, K. (2020). Fixed Fire Fighting and Emergency Ventilation Systems for Highway Tunnels – Literature Survey and Synthesis. Report FHWA-HIF-20-016. Federal Highway Administration. https://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/fixed_firefighting.pdf

7. Crosfield, R., Cavalo, A., Collela, F., Carvel, R., Torero, J. L., Rein, G. (2009). Landing Distance of Droplets from Water Mist Suppression Systems in Tunnels with Longitudinal Ventilation. Advanced Research Workshop on Fire Protection and Life Safety in Buildings and Transportation Systems, Santander, October 2009.

8. Directorate-General for Public Works and Water Management (2002). Project “Safety Test” – Report on Fire Tests. Civil Engineering Division. Utrecht, August 2002.

9. GW Sprinkler A/S (2018). GW M5 Water Mist Nozzle. Data Sheet No. SN010 1001 D, 7 August 2018. https://www.gwsprinkler.com/products/water-mist/15-m5-datasheet/file

10. Gupta, M., Rajora, R., Sahai, S., Shankar, R., Ray, A., Kale, S. R. (2012). Experimental evaluation of fire suppression characteristics of twin fluid water mist system. Fire Safety Journal, 54, 130–142. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.08.007. sciencedirect.com

11. Jeong, C. S., Lee, C. Y. (2021). Experimental investigation on spray characteristics of twin-fluid nozzle for water mist and its heptane pool fire extinguishing performance. Process Safety and Environmental Protection, 148, 724–736. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.037.

12. Hua, J., Kumar, K., Khoo, B. C., Xue, H. (2002). A Numerical Study of the Interaction of Water Spray with a Fire Plume. Fire Safety Journal, 37(7), 631–657. https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00026-7

13. ILF (2013). Auswertung der ASFINAG-Tunnelbrandstatistik 2006–2012. Studie im Auftrag des BMVIT und der ASFINAG. Linz.

14. Ingason, H., Li, Y. Z., Lönnermark, A. (2011). Runehamar Tunnel Fire Tests. SP Report 2011:55. SP Technical Research Institute of Sweden.

15. Ingason, H., Lönnermark, A. (2005). Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels. Fire Safety Journal, 40(7), 646–668.

16. Lemaire, T., Kenyon, Y. (2006). Large Scale Fire Tests in the Second Benelux Tunnel. Fire Technology, 42(4), 329–350.

17. Leucker, R., Leismann, F. M. (2013). Fire tests for water mist fire suppression systems in road tunnels. In: Anagnostou, G., Ehrbar, H. (eds.). Underground – The Way to the Future. Proceedings of the World Tunnel Congress, Geneva, Switzerland, 31 May – 7 June 2013, 366–375. London: Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-138-00094-0.

18. NFPA (2006). NFPA 750: Standard on Water Mist Fire Protection Systems. National Fire Protection Association.

19. NFPA (2019). NFPA 750: Standard on Water Mist Fire Protection Systems. National Fire Protection Association.

20. NFPA (б.г.). NFPA 25: Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems. National Fire Protection Association.

21. PIARC (2011). Design fire characteristics for road tunnels. Technical Committee C4: Road Tunnels Operation. Непубликуван материал, септември 2011.

22. PNR Italia (б.г.). Техническа документация за дюзи от серия D, модел DCU 1940. https://www.pnr.eu

23. Rein, G., Carvel, R., Torero, J. L. (2009). Approximate trajectories of droplets from water mist suppression systems in tunnels. International Water Mist Conference, London, 23–24 September 2009.

24. SOLIT2 Research Consortium (2012a). SOLIT Engineering guidance for a comprehensive evaluation of tunnels with fixed firefighting systems. Scientific report of the SOLIT2 research project.

25. SOLIT2 Research Consortium (2012b). SOLIT2 Report, Annex 2: Selected Results of Full Scale Fire Tests.

26. Tarada, F. (2009). Emerging trends in tunnel fire suppression. Eurotransport, 5.