

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vladimiras SUSLAVIČIUS

MOBILAUS IMPULSINIO HIDRAULINIO
IR PNEUMATINIO GAISRO ŽIDINIŲ
GESINIMO ĮRENGINIO TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
TRANSPORTO INŽINERIJA (03T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNICA 2011

Disertacija rengta 2002–2011 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Disertacija ginama eksternu.

Mokslinis konsultantas

prof. habil. dr. Marijonas BOGDEVICĖIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Adolfas BAUBLYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Nariai:

prof. habil. dr. Algimantas FEDARAVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

prof. habil. dr. Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T),

prof. dr. Vytautas TURLA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, mechanikos inžinerija – 09T),

prof. habil. dr. Janis VIBA (Rygos technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Disertacija bus ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2011 m. birželio 15 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel. (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2011 m. gegužės 13 d.

Disertaciją galima peržiūrėti interneto svetainėje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 1888-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-XXX

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2011

© Vladimiras Suslavičius, 2011

v.suslavicius@vpgt.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Vladimiras SUSLAVIČIUS

INVESTIGATION OF THE MOBILE
IMPULSE HYDRAULIC AND PNEUMATIC
FIRE FIGHTING DEVICE
FOR EXTINGUISHING SMALL-SCALE
FIRES

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
TRANSPORT ENGINEERING (03T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2002–2011.

The dissertation is defended as an external work.

Scientific Consultant

Prof Dr Habil Marijonas BOGDEVICĖIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Transport Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Adolfas BAUBLYS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

Members:

Prof Dr Habil Algimantas FEDARAVIČIUS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – 03T),

Prof Dr Habil Rimantas KAČIANAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T),

Prof Dr Vytautas TURLA (Vilnius Gediminas Technical University, Mechanical Engineering – 09T),

Prof Dr Habil Janis VIBA (Riga Technical University, Transport Engineering – 03T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Transport Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 15 June 2011**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 13 May 2011.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Internet website <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos gesinimo skysčio tiekimo nedideliems gaisro židiniams gesinti problemos. Pagrindiniai tyrimo objektai – gesinimo skysčio (vandens) tiekimo technologiniuose įrenginiuose, naudojančiuose suslėgto oro energiją ir užtikrinančiuose efektyvų vandens naudojimą pradiniais gaisro židiniais likviduoti, vykstantys dinaminiai ir hidrodinaminiai procesai. Šie įrenginiai svarbūs gesinant nedidelius gaisro židinius, kuriems likviduoti reikia kur kas mažiau išteklių nei išsiplėtusiems gaisrams gesinti. Vykstančių procesų analizė ir tyrimai leidžia parinkti tinkamų techninių charakteristikų technologinius įrenginius, kurie gali būti naudojami ne tik priešgaisrinėse gelbėjimo tarnybose, bet ir įrengiami įvairiuose transporto objektuose: laivuose, geležinkelio transporte, skraidymo aparatuose, kovinėse ir specialiosiose mašinose. Pagrindinis disertacijos tikslas – sukurti hidraulinio ir pneumatinio gesinimo įrenginio matematinius modelius, kurie aprašo dinامينius ir hidrodinامينius procesus bei leidžia nustatyti reikiamus fizinius įrenginių parametrus. Taip pat norima nustatyti siektinus tiekiamo gesinti disperguoto vandens parametrus.

Darbe sprendžiami šie uždaviniai: nustatomi nedideliems gaisro židiniams likviduoti reikalingo disperguoto vandens parametrai, sudaromi impulsinio hidraulinio ir pneumatinio gesinimo įrenginio matematiniai modeliai, sudaromas naujų savybių gesinimo įrenginio dinaminis modelis, nagrinėjama įrenginio ir naudotojo sąveika, tiekiant vandenį gesinti.

Disertacijoje apžvelgti esamų technologinių įrenginių trūkumai ir tyrimai, vykdomi jiems tobulinti. Nustatyti disperguoto vandens, reikalingo tiekti gesinimui per įrenginius, parametrai. Sudaryti matematiniai modeliai leidžia nagrinėti dinامينius ir hidrodinامينius procesus. Įvertinant esamų impulsinių hidraulinių ir pneumatinių gesinimo įrenginių trūkumus ir remiantis atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatais, pasiūlytas naujų charakteristikų įrenginio modelis, sudarytas matematinis jo veikimo modelis, kuris leidžia pritaikyti įrenginį pagal poreikį, didinant gesinimo efektyvumą ir mažinant poveikį naudotojui.

Naudojantis disertacijoje gautais tyrimų duomenimis ir sudarytais matematiniais modeliais, galima kurti gesinimo įrenginius, kuriuose vanduo į židinius transportuojamas suslėgtu oru, galinčius keisti šiuo metu įvairiuose transporto objektuose įrengtas gesinimo sistemas, naudojančias aplinkai žalingas medžiagas.

Abstract

The dissertation investigates the problems of supplying fire-extinguishing fluids for extinguishing small-scale fires. The research objects include extinguishing fluid (water) transportation by technological devices using the compressed air power and ensuring the efficiency of using the water for liquidating the initial ignition spots, and the dynamic and hydrodynamic processes. These devices play an important role in controlling fire outbreaks with much less extinguishing media than the resources required to control big-scale fires. The analysis of the processes and the investigation performed allows us to choose suitable technical characteristics for technological equipment, which could be used not only by fire and rescue services, but also be applied for fire protection in various means of transport, e.g. ships, rail transport, flying apparatuses and military and special vehicles. The primary purpose of this dissertation is to create the mathematical models that describe the ongoing dynamic and hydrodynamic processes, allowing us to determine the required physical parameters of the devices. The dissertation also aims to determine the parameters of water for extinguishing sprays.

The approaches used in the work serve the following major tasks: to define the parameters of the atomized water suitable for extinguishing small-scale fires, to construct the mathematical models of the hydraulic and pneumatic impulse extinguisher and to create a dynamic model of the firefighting device with the new features.

In the dissertation, the main drawbacks of the currently used technological devices and the research carried out to eliminate them are described. The main parameters of the atomized water transported through these fire extinguishing devices are determined. The developed mathematical models allow us to analyse the ongoing dynamic and hydrodynamic processes. Taking into account the drawbacks of the available hydraulic and pneumatic extinguishers and based on the results of the performed experimental research, the author offered the device model with new characteristics and developed a mathematical model of its operation. This allows the device to be used for the intended purpose and to increase fire extinguishing efficiency, decreasing a harmful effect on the user.

Based on the research data and the developed mathematical models described in the dissertation, it is also possible to create extinguishing devices, using the compressed air for water transportation to the site of the fire. They may change fire-extinguishing systems currently found in various transport facilities, which use the materials producing a harmful effect on the environment.

Žymėjimai

Simboliai

A – plotas;
 $[C]$ – slopinimo matrica;
 F – jėga;
 G – dujų masės debitas;
 $[K]$ – standumo matrica;
 $[M]$ – masių matrica;
 m_i – i kūno masė;
 Nu – Nuselto skaičius;
 p – dujų slėgis;
 R – dujų konstanta;
 Re – Reinoldso skaičius;
 $sign$ – ženklo funkcija;
 T – temperatūra;
 t – laikas;
 v – greitis;
 γ – kinematinė klampa;
 ρ – tankis.

Santrumpos

IHPGI – impulsinis hidraulinis ir pneumaticinis gesinimo įrenginys (angl. IHPED – *impulse hydraulic and pneumatic extinguishing device*);

LSD – Lietuvos statistikos departamentas;

PAGD – Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamentas.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	2
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	3
Darbo tikslas.....	4
Darbo uždaviniai	4
Tyrimų metodika	4
Darbo mokslinis naujumas	5
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	5
Ginamieji teiginiai.....	5
Darbo rezultatų aprobavimas.....	6
Disertacijos struktūra.....	6
 1. LITERATŪROS IR ESAMŲ GESINIMO SKYSČIŲ TRANSPORTAVIMO ĮRENGINIŲ APŽVALGA	 9
1.1. Gesinimo medžiagų (vandens) transportavimo gaisrams gesinti būdai.....	9
1.2. Esamų gaisrinių švirkštų naudojimo nedideliems židiniams gesinti analizė	17
1.3. Gesinimo vandens rūku tyrimai.....	22
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	25
 2. ĮRENGINIO DINAMINIŲ IR HIDRODINAMINIŲ PROCESŲ TEORINIAI TYRIMAI.....	 27

2.1. Teorinis vandens srauto skaidymo pagrindumas	27
2.2. Įrenginio matematinis modelis	33
2.3. Automatinio įrenginio pagrindumas ir jo dinaminių bei hidrodinaminių procesų modeliavimas.....	39
2.4. Įrenginio ir naudotojo, kaip biomechaninės sistemos, sąveikos matematinis modelis.....	53
2.5. Antrojo skyriaus išvados	62
3. ĮRENGINIO TEORINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ ANALIZĖ.....	63
3.1. Įrenginio hidrodinaminių procesų analizė	63
3.2. Automatinio įrenginio dinaminių ir hidrodinaminių procesų teorinių rezultatų analizė	66
3.3. Įrenginio ir naudotojo, kaip biomechaninės sistemos, sąveikos analizė.....	69
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	73
4. EKSPERIMENTINIAI ĮRENGINIO HIDRODINAMINIŲ BEI DINAMINIŲ PROCESŲ TYRIMAI	75
4.1. Naudojama eksperimentinė įranga ir priemonės	75
4.2. Įrenginio hidrodinaminių procesų eksperimentiniai tyrimai	81
4.3. Eksperimentinių tyrimų analizė	87
4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados	91
BENDROSIOS IŠVADOS	93
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	95
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	101
SUMMARY IN ENGLISH.....	103
PRIEDAI ¹	121
A priedas. Automatinio impulsinio hidraulinio ir pneumatinio gesinimo įrenginio konstrukcinio modelio schema ir sudėtinės jo dalys	123
B priedas. Gaisro gesinimo švirkštų čiurkšlių koordinačių parametrai	125
C priedas. Bendra autorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje.....	127
D priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	133

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem	2
Topicality of the thesis	2
The object of research	3
The aim of the thesis	4
The tasks of the thesis	4
The research methods	4
Scientific novelty.....	5
Practical significance of achieved results	5
Defended statments	5
Approval of the research results	6
The structure of the dissertation	6
 1. A SURVEY OF THE RELATED WORKS AND CURRENTLY USED EXTINGUISHING FLUID TRANSPORTATION DEVICE	 9
1.1. The methods of transportation fire extinguishing fluids (water)	9
1.2. Analysis of using existing fire nozzles for extinguishing small scale fires	17
1.3. Ongoing investigations for the extinguishing fires by the water mist	22
1.4. Conclusions of Chapter 1 and formulating tasks for the dissertation	25
 2. THEORETICAL RESEARCH INTO DYNAMIC AND HYDRODYNAMIC PROCESSES TAKING PLACE IN DEVICE	 27

2.1. Theoretical validity of the water spray atomization	27
2.2. Mathematical model of the device.....	33
2.3. Automatic device validity and its dynamic and hydrodynamic modeling.....	39
2.4. Mathematical model of the interaction between the device and its user as a biomechanical system	53
2.5. Conclusions of Chapter 2	62
3. THE ANALYSIS OF THE RESULTS OBTAINED IN THEORETICAL RESEARCH.....	63
3.1. Analysis of the hydrodynamic processes taking place inside the device.....	63
3.2. Analysis of the theoretical dynamic and hydrodynamic processes taking place inside the automatic device	66
3.3. Analysis of the interaction between device and its user as a biomechanical system	69
3.4. Conclusions of Chapter 3	73
4. EXPERIMENTAL RESEARCH INTO HYDRAULIC AND DYNAMIC DEVICE PROCESSES	75
4.1. Devices and equipment were used	75
4.2. Experimental research into hydrodynamic device processes	81
4.3. Analysis of experimental research.....	87
4.4. Conclusions of Chapter 4	91
GENERAL CONCLUSIONS	93
REFERENCES	95
LIST OF PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	101
SUMMARY IN ENGLISH.....	103
ANNEXES ¹	121
Annex A. The chart of the automatic impulse hydraulic and pneumatic extinguishing device structure model and its component parts	123
Annex B. Coordinate parameters of the various nozzle jets	125
Annex C. The coauthors' agreements to present publications for the dissertation defence	127
Annex D. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	133

¹The annexes are supplied in the enclosed compact disc

Įvadas

Nė viena pasaulio šalis, nepaisant jos išsivystymo lygio, negali išvengti kylančių gaisrų, nelaimingų atsitikimų, katastrofų, kurie įvyksta tiek dėl žmogaus veiklos, tiek dėl Žemėje vykstančių gamtinių procesų. Statistiniais duomenimis, labiau ekonomiškai pažengusiose valstybėse vyksta kur kas daugiau gaisrų ir kitų atsitikimų, nes esant intensyvesnei žmogaus veiklai atsiranda ir didesnė įvairių nelaimių kilimo tikimybė. Jokia šalis negali išvengti nuostolių, patiriamų dėl kilusių gaisrų ir kitų incidentų, tačiau nuostolių mastą galima mažinti laiku reaguojant reikiamomis priemonėmis. Todėl kiekvienoje valstybėje steigiamos priešgaisrinės gelbėjimo tarnybos, kurios aprūpinamos reikalingomis techninėmis priemonėmis.

Kiekvienais metais Lietuvoje, priklausomai nuo oro sąlygų, kyla apie 16 tūkst. gaisrų. Tačiau ypač sausringais metais gaisrų gali būti kur kas daugiau, pvz., 2002 m. kilo 21 237 gaisrai, padarę 30,8 mln. litų nuostolių. Realūs nuostoliai yra gerokai didesni, nes nėra vertinami nuostoliai dėl gamybos ar veiklos sutrikimo. Kilę gaisrai smarkiai teršia aplinką ir daro neigiamą įtaką žmonių sveikatai. Akivaizdu, kad kuo greičiau užgesinami gaisrai, tuo mažesni nuostoliai.

Gaisras – tai nekontroliuojamas, ne tam skirtoje vietoje vykstantis degimas, keliantis pavojų žmogui, turtui ar aplinkai. Siekiant sumažinti nuostolius, būtina kuo greičiau gaisrus užgesinti. Greičio veiksnys ekstremaliose situacijose turi

ypatingą reikšmę. Pavyzdžiui, žmonių žūties tyrimai gaisruose rodo, kad 60–70 % žmonių žūsta apsinuodiję gaisro dujomis pirminėje jo stadijoje (iki 5–6 min. nuo gaisro kilimo pradžios). Materialiniai nuostoliai dėl kilusių gaisrų turi tiesioginį ryšį su paties gaisro degimo trukme. Gaisro degimo sutrumpinimas 1 min., remiantis atliktais tyrimais Didžiojoje Britanijoje, gali sumažinti 5,3 % žuvusiųjų skaičių gaisruose. Santykinis žuvusiųjų skaičiaus gaisruose rodiklis Lietuvoje daugiau nei 7 kartus viršija Europos Sąjungos senbuvų šalių rodiklius: Lietuvoje 2010 m. – 7,2 žuvusiųjų/100 tūkst. gyventojų (*PAGD statistika; Gyventojų skaičius*), Vokietijoje – 0,7, Italijoje – 0,8, Olandijoje – 0,5, Didžiojoje Britanijoje – 1,1, Prancūzijoje – 1,1, Ispanijoje – 0,6, Austrijoje – 0,8.

Problemos formulavimas

Gesinimo skysčio transportavimas (pro gesinimo įrenginius į gaisro židinius) turi lemiamą reikšmę gesinimo efektyvumui. Gesinimo skysčių transportavimo tyrimai leidžia nustatyti optimesnių parametų priemones, tinkamiausias konkreitiems objektams gesinti. Nedideliems gaisro židiniams gesinti gesinimo skysčių transportavimo tyrimai nėra išsamūs, dėl to neįmanoma parinkti racionaliausios įrangos.

Disertacijoje numatoma atlikti transportuojamų gesinimo skysčių hidrodinaminių procesų tyrimus, jų poveikį naudotojams, sudaryti matematinius modelius, kurie leistų parinkti reikiamų charakteristikų įrenginius.

Darbo aktualumas

Taip jau yra nuo seno, kad labiausiai prieinama ir gesinti naudojama medžiaga yra vanduo. Vanduo pasižymi ypatingomis fizinėmis ir cheminėmis savybėmis, turi tokias šilumos absorbavimo charakteristikas, kurių stīga dažniausiai gamtoje aptinkamoms medžiagoms. Tačiau neefektyviai naudojant vandenį gesinti, nuostoliai dėl vandens poveikio viršija nuostolius dėl sudegusio turto ir kitų vertybių. Kaip parodė patentinės ir techninės literatūros apžvalga, šioje srityje intensyviai dirbama daugelyje šalių, taikomi įvairūs vandens tiekimo būdai: dinaminiais ir tūriniais vandens siurbliais, naudojant suslėgtųjų dujų energiją.

Kiekvienas didesnis gaisras dažniausiai prasideda nuo nedidelių židinių, kurių pastebėjimas bei likvidavimas laiku turi lemiamą įtaką nuostoliams nuo gaisrų mažinti. Nedideliame židiniui likviduoti reikia kur kas mažiau išteklių nei jau išsiplėtusiam gaisrui gesinti. Šiuolaikinėje visuomenėje, kurioje gerai išvystytos ryšio ir informacinės sistemos, atsiranda galimybių apie pastebėtus gaisro židinius gana greitai pranešti priešgaisrinėms gelbėjimo tarnyboms, kurios, jei gerai

išsidėsčiusios vietovėje, gali operatyviai atvykti į įvykio vietas ir likviduoti gaisrus dar pirminių jų etapų. Todėl, kaip teigia statistiniai duomenys, daugiau kaip 50 % visų kilusių gaisrų gesinama tikrai vienu švirkštu. Akivaizdu, kad turint bei naudojant efektyvias nedidelių gaisro židinių gesinimo priemones galima būtų likviduoti didesnę dalį visų kilusių gaisrų. Tokios priemonės leidžia priešgaisrinių gelbėjimo tarnyboms labai greitai reaguoti, židiniai likviduojami su minimaliais ištekliais. Tačiau šiuo metu priešgaisrinėse gelbėjimo tarnybose vandeniui transportuoti dažniausiai naudojami išcentriniai gaisriniai siurbliai, gaisrinės žarnos, purkštuviniai švirkštai, t. y. įranga, kuri nepritaikyta nedideliams židiniams gesinti. Tad su šia įranga daugelyje gaisrų vandens išsikvojama per daug.

Kaip parodė analizė, nedideliams gaisro židiniams likviduoti priimtiniausia naudoti mobilius įrenginius, kuriuose vanduo tiekiamas dėl suslėgto oro sukauptos energijos. Tokius įrenginius gamina įvairios firmos pasaulyje: „Ifex Technologies“ (Vokietija), „Faser“ (Lenkija), „Tempero“ (Rusija), „Sakura Gomme KK“ (Japonija), „ADA Technologies Inc.“. Tačiau šios priemonės nėra iki galo ištobulintos, jų parametrai dažnai nėra optimalūs (pvz., didelis svoris, nepakankamas gesinimo efektyvumas). Dėl šių priežasčių priešgaisrinės gelbėjimo tarnybos neretai vengia tokias priemones diegti ir naudoti.

Tenkinant Lietuvos valstybinės priešgaisrinės gelbėjimo tarnybos poreikius, buvo įsigyti ir pradėti naudoti impulsinio gesinimo įrenginiai IFEX 3012 ir FASER IPG-1. Šie įrenginiai parodė gerokai didesnes galimybes efektyviau naudoti vandenį gesinimui. Eksploatuojant nustatyti kai kurie tokios įrangos trūkumai: nepakankamas vandens transportavimo intensyvumas į degantį paviršių, didelis svoris, nemaža atatranka paleidžiant vandens srautą. Gesinimo įrangos, skirtos nedideliams židiniams likviduoti, trūkumai paaiškinami tuo, kad nebuvo atlikti išsamūs tyrinėjimai.

Gesinimo skysčių transportavimo įrenginiai, naudojantys suslėgto oro energiją, sėkmingai gali būti pritaikyti transportinių ar stacionarių objektų tam tikrų agregatų automatinio gesinimo sistemose.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – transportuojamo gesinimo skysčio dinaminiai ir hidrodinaminiai procesai, hidraulinis ir pneumatinis gesinimo įrenginys.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas – nustatyti siektinus transportuojamo ir disperguojamo įrenginiu vandens parametrus, tinkamiausius nedideliems gaisro židiniams gesinti, sukurti hidraulinio ir pneumatinio gesinimo įrenginio matematinį modelį ir ištirti šio įrenginio dinامينius bei hidrodinامينius procesus.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe buvo suformuluoti šie uždaviniai:

1. Išanalizuoti ir apibendrinti pasaulinius vandens transportavimo į gaisro židinius metodus ir atliktus jų tyrimus, nustatyti racionalius nedideliems gaisro židiniams likviduoti reikalingo disperguoti vandens parametrus.
2. Sudaryti impulsinio hidraulinio ir pneumatinio gesinimo įrenginio matematinis modelius (hidrodinامينių procesų ir atatrakos).
3. Sudaryti naujų parametrų impulsinio hidraulinio ir pneumatinio gesinimo įrenginio matematinį modelį.
4. Atlikti impulsinio hidraulinio ir pneumatinio įrenginio fizinio modelio eksperimentinius tyrimus.
5. Atlikti matematinių modelių skaičiavimo rezultatų ir eksperimentinių tyrimo duomenų analizę bei pateikti išvadas.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti teoriniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Atlikti teoriniai tyrimai, pagrįsti hidrodinamikos, teorinės mechanikos ir gaisrų dinamikos teorija, pritaikant analitinius ir skaitinius tyrimo metodus. Dinامينių ir hidrodinامينių procesų teoriniams tyrimams naudota kompiuterinė programinė įranga *Compaq Visual Fortran Professional v 6.3* ir *Maple 9.01*. Eksperimentiniams tyrimams naudota kompanijų *Toshiba* skaitmeninė fotoįranga, *Hameg Instrumentations* matavimo prietaisai, *Danfoss* slėgio jutikliai.

Teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai atlikti VGTU Transporto inžinerijos fakulteto Transporto technologinių įrenginių katedroje, Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento Ugniagesių gelbėtojų mokykloje ir Specialiojoje priešgaisrinėje gelbėjimo valdyboje.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie nauji rezultatai:

1. Sudarytas esamo impulsinio hidraulinio ir pneumatinio gesinimo įrenginio (toliau – IHPGĮ) hidrodinaminių procesų matematinis modelis, įvertinantis suslėgtojo oro ir skysčio sąveiką, slėgio bangų sklaidimą skystyje ir vandens transportavimo gesinimui sąlygas.

2. Sudarytas automatinio IHPGĮ procesų matematinis modelis, kuris įvertina, nepriklausomai nuo naudotojo, periodinį impulsinį vandens srauto išmetimą į gaisro židinius.

3. Sudarytas naudotojo, kaip biomechaninės sistemos, ir IHPGĮ tarpusavio sąveikos matematinis modelis, įvertinantis atitransmis poveikio jėgas naudotojui.

4. Nustatytas nedideliems gaisro židiniams gesinti reikiamo gesinimo medžiagų (vandens) transportavimo intensyvumas.

5. Remiantis teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais nustatyti racionalūs IHPGĮ parametrai.

6. Sukurtas originalus IHPGĮ principinis veikimo modelis (Lietuvos Respublikos patentų registre 2007 m. liepos 25 d. registruotas išradimas Nr. 5436).

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Nustatytas nedideliems gaisro židiniams gesinti reikalingas tiekiamo vandens intensyvumas ir juo remiantis parinkti IHPGĮ racionalūs parametrai. Sukurta originali automatinio IHPGĮ konstrukcija, kuri gali būti pagaminta ir naudojama priešgaisrinėse gelbėjimo tarnybose, transporto objektuose, įmonėse, įstaigose ar organizacijose nedideliems gaisro židiniams ar agregatams gesinti. Sudaryti IHPGĮ dinaminių ir hidrodinaminių procesų matematiniai modeliai, kurie gali būti naudojami analogiškų įrenginių parametrų ir hidrodinaminių procesų analizei.

Ginamieji teiginiai

1. Sudarytas IHPGĮ hidrodinaminių procesų matematinis modelis įvertina suslėgtojo oro ir skysčio sąveiką, slėgio bangų sklaidimą skystyje ir vandens transportavimo sąlygas.

2. Sudarytas originalus automatinis IHPGĮ procesų matematinis modelis įvertina vandens srauto periodinį impulsinį išmetimą į gaisro židinius.

3. Sudarytas naudotojo, kaip biomechaninės sistemos, ir IHPGI sąveikos matematinis modelis įvertina šio įrenginio išmetamo vandens srauto atatrąkos jėgą biomechaninei sistemai.

4. Nustatytas gesinimo medžiagų (vandens) transportavimo $0,126 \text{ kg/m}^2\text{s}$ intensyvumas užtikrina nedidelių gaisro židinių gesinimą.

5. Sukurtas automatinio IHPGI veikimo būdas yra originalus, užtikrinantis efektyvesnį nedidelių gaisro židinių gesinimą.

Darbo rezultatų apibendrinimas

Disertacijos tema yra paskelbti keturi moksliniai straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose (Suslavičius, Bogdevičius 2008; Bogdevičius, Suslavičius 2006b; Bogdevičius, Suslavičius 2005; Suslavičius, Bogdevičius 2003), iš kurių vienas žurnale, įtraukta į *ISI Web of Science* sąrašą.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti dešimtyje mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje (7-iose tarptautinėse ir 3-jose Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijose), iš kurių du – konferencijų medžiagoje, referuotose ISI duomenų bazėje, šeši – recenzuojamose tarptautinių konferencijų medžiagoje:

- Tarptautiniame kongrese „12th World Congress in Mechanism and Machine Science IFToMM 2007“ 2007 m. Besanson, Prancūzijoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „JFPS International Symposium on Fluid Power“ 2008 m. Toyma, Japonijoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Modern Building Materials, Structures and Techniques“ 2007 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Material Handling, Constructions and Logistics“ 2006 m. Belgrade;
- Tarptautinėse konferencijose „Transport Means“ 2005, 2006 m. Kaune;
- Tarptautinėje konferencijoje „Transbaltica – 03“ 2003 m. Vilniuje;
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ 2002–2005 m. Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir keturi priedai.

Įvadiniam skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė,

ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame pateikta gesinimo medžiagų (vandens) tiekimo gaisrams gesinti naudojami būdai, esamų gesinimo švirkštų analizė, vykdomi tyrimai gesinimo vandens rūku. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateiktas teorinis vandens srauto skaidymo pagrindumas, impulsinio hidraulinio pneumatinio gesinimo įrenginio (toliau – IHPGI) matematinis modelis, naujų savybių automatinio IHPGI dinaminių ir hidrodinaminių procesų modeliavimas, IHPGI ir naudotojo sąveikos matematinis modelis.

Trečiajame skyriuje pateikta IHPGI atliktų teorinių tyrimų rezultatų analizė.

Ketvirtajame skyriuje pateikti atliktų hidrodinaminių tyrimų duomenys.

Darbo pabaigoje pateiktos bendrosios išvados.

Rašant disertaciją naudotasi 83 literatūros šaltiniais.

Literatūros ir esamų gesinimo skysčių transportavimo įrenginių apžvalga

Šiame skyriuje apžvelgiami žinomi gesinimo medžiagų (vandens) transportavimo gaisrams gesinti būdai, jų privalumai ir trūkumai, nagrinėjama vandens smulkinimo į lašelius svarba gesinimui, apibendrinami hidraulinių ir pneumatinių gesinimo įrenginių darbo principai, remiantis atlikta analize suformuluojami pagrindiniai hidraulinio ir pneumatinio gesinimo įrenginio, skirto nedideliems gaisro židiniams slopinti, tyrimų tikslai ir uždaviniai.

1.1. Gesinimo medžiagų (vandens) transportavimo gaisrams gesinti būdai

Gaisras – tai nekontroliuojamas, ne tam skirtoje vietoje vykstantis degimas, keliantis pavojų žmogui, turtui ar aplinkai (Lietuvos Respublikos priešgaisrinės saugos įstatymas). Materialiniai nuostoliai dėl kilusių gaisrų turi tiesioginį ryšį su paties gaisro degimo trukme. Gaisro degimo sutrumpinimas 1 min., remiantis atliktais tyrimais Didžiojoje Britanijoje, gali sumažinti 5,3 % žuvusiųjų gaisruo-

se skaičių (Grimwood 1992). Taigi gesinimo įrangos charakteristikos turi lemiamą reikšmę gaisrų gesinimui.

Taip jau yra nuo seno, kad prieinamiausia ir daugiausia naudojama gesinti medžiaga yra vanduo. Vanduo pasižymi ypatingomis fizinėmis ir cheminėmis savybėmis, turi tokias šilumos absorbuavimo charakteristikas, kurių stinga dažniausiai gamtoje pasitaikančioms medžiagoms. 1 litrui vandens įkaitinti nuo 20 °C iki 100 °C reikia 335 kJ šiluminės energijos bei dar 2257 kJ, kad jį paversėtų garais (Wieder *et al.* 1992). Daug metų žmonės bandė rasti geresnius būdus, kaip transportuoti vandenį gesinimui ir efektyviau jį panaudoti. Neretai neefektyviai naudojant vandenį, nuostoliai dėl vandens poveikio viršija nuostolius dėl sudegusio turto ir kitų vertybių (Elagin 2005). Ištekantis iš gaisravietės gesinti naudojamas vanduo užteršia aplinką ir smarkiai pablogina bendrą ekologinę būklę, praktiškai neprisideda prie gesinimo ir eikvojamas veltui. Taip atsitinka dėl to, kad dalis vandens nespėja perimti visos galimos šilumos bei pavirsti garais dėl didelio vandens paviršiaus įtempimo, kuris neleidžia jam absorbuotis į degančias medžiagas.

Šiuo metu priešgaisrinėse gelbėjimo tarnybose vandeniui transportuoti daugiausia naudojami išcentriniai gaisriniai siurbliai, gaisrinės žarnos, purkštuviniai švirkštai. Akivaizdu, kad kuo labiau susmulkinsime vandenį, tuo didesnį paviršiaus plotą iš to paties jo tūrio gausime, kuris tiesiogiai galės kontaktuoti su gaisro karščiu ir tuo efektyviau bus išnaudojamos vandens savybės. Pavyzdžiui, jeigu į ugnį vanduo būtų pilamas kaip iš kibiro, tai jo savybės gali būti panaudotos tikrai 5–10 % efektyvumu. Taigi gesinimo vandens paviršiaus ploto didinimas didina ir jo naudojimo efektyvumą. Didinti vandens paviršiaus plotą galima paprasčiausiai jį susmulkinant į atskirus mažus lašelius. Kuo mažesni lašeliai, tuo geriau išnaudojamos vandens savybės ir tuo mažiau jo reikia gaisrui gesinti. Geriau susmulkinti tiekiamą gesinti vandenį galima šiais pagrindiniais būdais (Suslavičius, Aladjev 2003; Suslavičius 2002):

1. Naudoti specialius purkštuvinius švirkštus, kurie gerokai geriau susmulkina vandenį į atskirus lašelius.

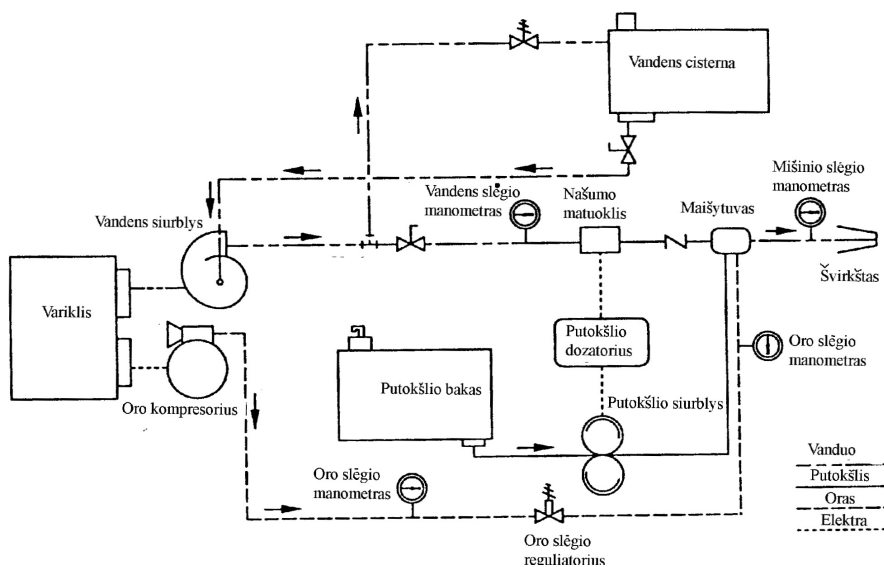
2. Didinti tiekiamo vandens slėgį, kuris, ištekėdamas pro švirkštus, geriau suskaidomas.

3. Mažinti vandens paviršiaus įtempimo jėgas.

Pirmu atveju, naudojant šiuolaikinius purkštuvinius švirkštus ir išcentrinius siurblius, esant 0,4–0,7 MPa vandens tiekimo slėgiui galima pasiekti 0,3 mm skersmens lašelių dydžius čiuurkšlėje (Suslavičius 1995; IFSTA 1990). Dar labiau susmulkinti vandens lašelius, nedidinant vandens tiekimo slėgių, yra gana sudėtinga. Todėl gaisriniuose automobiliuose vietoje vienos pakopos išcentrinių siurblių naudojami daugiapakopiai. Tiekiamo gesinti vandens slėgis padidinamas nuo 1 MPa iki 4 MPa. Atskirais atvejais naudojami tūriniai siurbliai (membraniniai ir stūmokliniai) ir slėgis sukeliamas iki 6–20 MPa. Esant didesniems

slėgiams vanduo geriau smulkinamas ir todėl reikalingas mažesnis jo kiekis (Larson, Westerlund 2006, 2010). Trečiu atveju naudojami įvairūs chemikalai, kurie sumažina vandens paviršiaus įtempimo jėgas. Šie chemikalai vadinami putokšliais ir drėkikliais. Vanduo su mažesnėmis paviršiaus įtempimo jėgomis gali būti ne tik labiau suskaidomas, bet jis kur kas geriau įsiskverbia į degančius paviršius. Tačiau geri putokšliai nėra pigūs, todėl daugiausia naudojami putoms sudaryti gesinant lengvesnes už vandenį medžiagas. Nors pastaruoju metu vis plačiau naudojamos ir pripažįstamos palyginti neseniai sukurtos CAFS sistemos. CAFS (*Compressed Air Foam System*) – tai suslėgto oro ir putų gesinimo sistema. Darbo principas pagrįstas tuo, kad vandens ir putokšlio mišinį aeruojant suslėgtu oru, gaunamos labai kokybiškos ir stabilios putos, kurios pro žarnas ir švirkštus tiekiamos gesinti. Mišiniui sudaryti naudojamas specialus A tipo putokšlis (Foam Concentrates; Firefighting Foam Products; NFPA 1145 2006), kurio reikalinga koncentracija vandenyje tesiekia 0,1–1 % (įprasto putokšlio koncentracija siekia 3–6 %). Vandens ir putokšlio mišinys maišomas su oru santykiu 1:7. Todėl gaisrinės žarnos su putomis yra lengvos, nes jose daugiau oro nei skysčių.

Naudojant CAFS sistemą, gesinimo efektyvumas padidėja 3–5 kartus, lyginant su gesinimu paprastu vandeniu (Scheffey, Williams 1991). Efektyvumas pasiekiamas dėl to, kad vanduo išlaikomas stabiliose putose ir visiškai neišteka iš gaisro vietos (pvz., naudojant kompaktinę ištisinę čiurkšlę, net iki 90 % vandens išteka iš gesinamo židinio nedarydamas gesinančio poveikio). Sistemos darbui būtina turėti oro kompresorių, putokšlio dozavimo įrenginį, vandens siurbį, slėgių reguliavimo prietaisus. Sistemos gali būti tiek autonominės, turinčios savo variklį, kompresorių, vandens siurbį ir kitus įrenginius, tiek naudojančios gaisriniame automobilyje įrengtą siurbį ir jo pavarą. Kadangi CAFS sistemos labai taupiai naudoja vandenį, todėl gaisriniuose automobiliuose netenka prasmės turėti dideles talpyklas gesinimo medžiagų (Suslavičius 2002; Hale CAFS products, Waterous CAFS systems). Sumontavus CAFS sistemas esamuose automobiliuose galima būtų mažinti vandens cisternų tūrį ir didinti išvežamos įrangos, reikalingos įvairiems darbams, kiekį. Nauji automobiliai su CAFS sistemomis galėtų būti kur kas mažesni ir manevringesni. Tačiau šių sistemų efektyvumui ir optimaliems parametrams nustatyti konkrečiuose gaisriniuose automobiliuose reikalingi tolesni tyrimai ir praktiniai bandymai, nes neteisingai naudojant sistemas gesinimo sąnaudos gali net didėti. Be to, CAFS įranga yra gana brangi, nes priklausomai nuo galingumo gali siekti net iki 15 % viso gaisrinio automobilio kainos, o jo darbui reikalingas specialus putokšlis. Struktūrinė CAFS schema parodyta 1.1 paveiksle.



1.1 pav. CAFS struktūrinė schema

Fig. 1.1. A structural chart of the CAFS

Dažniausiai vanduo gesinti šiuo metu tiekiamas naudojant jo kaip hidraulinio skysčio savybes per išcentrinis ar tūrinius siurblius. Slegiamo ir pro kiaurymę (gaisrinį švirkštą) ištekančio vandens slėgio energija paverčiama čiurkšlės kinetine energija. Jeigu vandeniui išpurkšti pro švirkštą bus naudojama suslėgtojo oro ar kitų dujų energija (vietoje paties vandens slėgio energijos), tai galima gauti gerokai didesnius čiurkšlės greičius. Tradiciškai švirkščiamo vandens lašelių greitis čiurkšlėje sudaro apie kelias dešimtis m/s, o panaudojus suslėgtojo oro energiją lašelių greitis gali siekti net šimtus m/s greičius (Johnson 1991). Be to, esant tokiems greičiams dėl oro pasipriešinimo čiurkšlė gali būti susmulkinama į mažesnius lašelius (net iki 2 mikronų skersmens). Dėl to smarkiai padidėja gesinti naudojamo vandens paviršiaus plotas ir jo naudojimo efektyvumas.

Kai vanduo būtų tiekiamas labai mažais lašeliais, visas jo savybes galima išnaudoti beveik 100 %. Be to, turtas ir vertybės dėl vandens poveikio nebūtų sugadinamos – nebūtų užliejamos vandeniui negesinamos patalpos. Daugelį gaisrų galima būtų gesinti naudojant mažesnius ir mobilesnius gaisrinius automobilius, nes nereikėtų didelių vandens talpyklų.

Suslėgtųjų dujų energiją naudojančios kilnojamosios gesinimo priemonės leidžia ugniagesiams gelbėtojams gesinti gaisrą nenaudojant gaisrinio automobilio siurblio bei nenuitiesiant žarnų linijų nuo jo iki židinio. Dėl to gali būti sutrumpinamas reagavimo laikas ir užtikrinamas gesinimo ekonomiškumas.

Kiekvienas didesnis gaisras dažniausiai prasideda nuo nedidelių židinių, kurių pastebėjimas bei likvidavimas laiku turi lemiamą įtaką mažinant gaisrų sukeltus nuostolius. Visiškai suprantama, kad nedideliame židiniui likviduoti reikia kur kas mažiau išteklių nei jau išsiplėtusiam gaisrui gesinti. Kuo greičiau užgesinami židiniai, tuo geriau apsaugoma žmonių gyvybė, sveikata ir turtas nuo suniokojimo. Šiuolaikinėje visuomenėje, kurioje yra išvystytos ryšio ir informacinės sistemos, atsiranda galimybių gana greitai apie pastebėtus gaisro židinius pranešti priešgaisrinėms gelbėjimo tarnyboms, kurios, jei gerai išsidėstytos vietovėje, gali operatyviai atvykti į įvykio vietas ir likviduoti gaisrus dar pirminių jų etapų. Todėl, remiantis statistiniais duomenimis (*PAGD statistika*), daugiau kaip 50 % visų kilusių gaisrų gesinama tik vienu švirkštu.

Remiantis vėliausiais statistiniais tyrimais, gaisro židinių išplitimas, atvykus priešgaisrinėms tarnyboms, ir jų procentas nuo bendro gaisrų skaičiaus sudarė (*Новые технологии..*):

- iki 5 m² – 29 %,
- nuo 5 iki 10 m² – 30 %,
- nuo 10 iki 30 m² – 20 %,
- nuo 30 iki 100 m² – 10 %,
- nuo 100 iki 600 m² – 9 %,
- daugiau nei 600 m² – 2 %.

Iš pateiktų duomenų matyti, kad turint ir naudojant veiksmingas nedidelių gaisro židinių gesinimo priemones, galima būtų likviduoti net apie 80 % visų kilusių gaisrų (VNIPO 2003). Nedideliais gaisro židiniais galima vadinti dar neišsiplėtusius gaisrus (iki 30 kv. m degimo ploto), kurie galėtų būti užgesinami priemonėmis, nenaudojančiomis didelį gesinimo medžiagų kiekį.

Tokių priemonių naudojimas labai pagreitina priešgaisrinių gelbėjimo tarnybų reagavimą, židiniai likviduojami su minimaliais ištekliais. Dėl to tokios priemonės daugeliu atvejų įtraukiamos į priešgaisrinių gelbėjimo tarnybų greito reagavimo ar pirmosios pagalbos automobilių privalomos įrangos sąrašus (Suslavičius, Bogdevičius 2003), gali būti naudojamos užtikrinant įvairių transporto avarijų padarinių likvidavimo darbuose (Suslavičius 2000).

Pats paprasčiausias suslėgtųjų dujų energijos naudojimo pavyzdys – gesintuvai, kai inde su gesinimo medžiagomis palaikomas atitinkamas slėgis, dėl kurio, atidarius čiaupą, slegiamas gesinimo skystis švirkščiamas reikiama kryptimi (*Fire extinguishers*). Tačiau naudojant tokio tipo gesintuvus negalima taip susmulkinti vandens, kaip tai padaroma naudojant tradicinius gaisrinius išcentrinus siurblius.

Gerokai pranašiau gesinimo vanduo gali būti tiekiamas, kai jo srautas ar čiurkšlė įgreitinama naudojant suslėgtųjų ir besiplečiančių dujų (oro) energiją. Tokio tipo gesinimo priemonėse vandens čiurkšlė gali būti veikiamą oro srauto,

t. y. gaunama nepertraukiama greitai judanti čiurkšlė, arba tam tikra porcija vandens iššauna dėl besiplečiančio oro, t. y. vanduo gesinimui tiekiamas impulsais.

Nepertraukiamos čiurkšlės, įgreitintos suslėgtojo oro, pranašumas tas, kad čiurkšlės greitis pasiekiamas iki 80 m/s, lašelių dydis – iki 0,1 mm skersmens. Tai leidžia kur kas geriau išnaudoti fizines ir chemines vandens savybes. Tokios priemonės pavyzdys yra IGLA-1-0,4 parodytas 1.2 paveiksle.



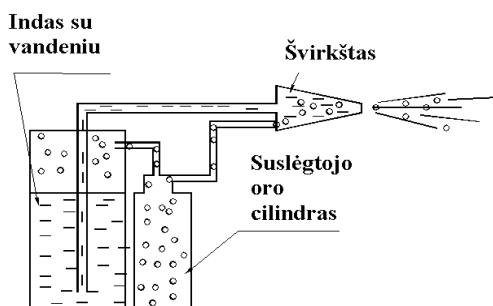
1.2 pav. Nepertraukiamos čiurkšlės įrenginys IGLA-1-0,4

Fig. 1.2. The device IGLA-1-0,4 of continuous water jet

Šio prietaiso pagrindiniai techniniai duomenys yra tokie:

- gesinimo vandens kiekis 12 l,
- čiurkšlės ilgis 10 m,
- vandens tiekimo intensyvumas 0,4 l/s,
- užpildyto prietaiso svoris 19 kg.

Iš suslėgtojo oro indo dalis oro tiekama į vandens rezervuarą, kuriame sudaromas atitinkamas slėgis. Slegiamas vanduo iš vandens rezervuaro tiekiamas į švirkštą, kuriame įgreitintas besiplečiančio oro srautu išmetamas į gaisro židinį. Tokiu principu, vandeniui transportuoti naudojant suslėgtojo ir besiplečiančio oro energiją, taip pat veikia „Telesto“ kompanijos švirkštai (Cwiok 2009; Extinguishmist). Tačiau nepertraukiamos čiurkšlės principu veikiantiems švirkštams reikia didelių suslėgtojo oro sąnaudų. Struktūrinė tokio įrenginio veikimo schema parodyta 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Nepertraukiamos čiurkšlės tiekimo gesinimo įrenginio struktūrinė schema
Fig. 1.3. Structural chart with continuous stream supply by the jet-fighting unit

Dar geriau vanduo gali būti susmulkintas, kai jo porcija iššaunama naudojant besiplečiančių dujų (oro) energiją. Vandens iššovimo (impulso) metu jo greitis pasiekia iki 120 m/s, o lašelių skersmuo yra net iki 0,002 mm. Tokios priemonės pavyzdys yra IFEX 3000 (*Impulse fire extinguishing technology*) pateiktas 1.4 paveiksle.



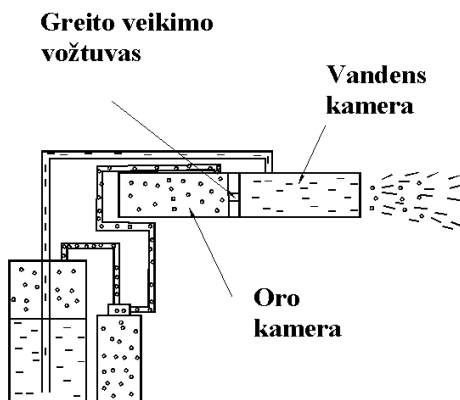
1.4 pav. IHPGI IFEX 3000 su vandens ir suslėgtojo oro talpyklomis
Fig. 1.4. IHPED IFEX 3000 with water and compressed air reservoirs

IFEX 3000 pagrindiniai duomenys:

– čiurkšlės maksimalus pasiekiamas atstumas	16 m,
– tiekiamo vandens kiekis impulso metu	0,25–1 l,
– laiko tarpas tarp impulsų	2–3 s,
– užpildyto švirkšto svoris be vandens ir oro talpyklų	8 kg.

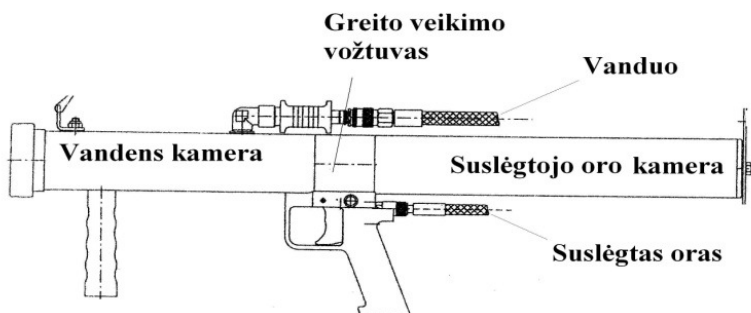
Struktūrinė tokio įrenginio veikimo schema parodyta 1.5 ir 1.6 paveiksluose. Impulsiniai švirkštai veikia taip:

- iš suslėgtojo oro talpyklos užpildoma suslėgtojo oro kamera;
- iš vandens talpyklos užpildoma vandens kamera;
- atidarius greitojo veikimo vožtuvą, susijungia suslėgtojo oro ir vandens kameros;
- vanduo, veikiamas oro slėgio, išpurškiamas per labai trumpą laiko tarpą (nuo kelių iki kelių dešimčių milisekundžių) į gaisro židinį;
- toliau procesas kartojamas iš naujo.



1.5 pav. Impulsinio gesinimo įrenginio struktūrinė schema

Fig. 1.5. Structural chart of the impulse fire fighting unit



1.6 pav. Bendras impulsinio švirkšto vaizdas

Fig. 1.6. Overall Picture of the impulse device

Iš impulsinio švirkšto išpurškiamas vanduo pasiekia net 120 m/s greitį (432 km/h). Vandens porcija, skrisdama tokiu greičiu, sutinka didelį oro pasipriešinimą ir dėl to čiurkšlė susiskaido į labai mažus lašelius (net iki 2 mikronų dydžio) ir praktiškai virsta greitai judančiu rūku. Toks rūkas turi labai gerų gesinimo savybių, nes labai gerai apgaubia visą aplinką, o smulkūs lašeliai greičiau absorbuoja šilumą. Tokiu pagrindu veikiantys impulsiniai švirkštai gaminami ne vienoje šalyje. Tačiau šiuo metu nėra sukurta jų veikimo matematinio modelio, leidžiančio nustatyti optimalius parametrus.

Atlikus bandymus su Vokietijos „IFEX GmbH“ pagamintu impulsiniu švirkštu IFEX 3001 nustatyti šie privalumai:

- labai geras išpuršlinimas, kuris sudaro sąlygas išnaudoti arti 100 % gesinamų vandens savybių;
- naudojant suslėgtąjį orą „šūviui“, t. y. išnaudojant oro tamprumą/spūdumą, pasiekiamas labai didelis vandens dalelių, kurios gerai skverbiasi į medžiagų paviršius, greitis;
- susidaręs rūkas gerai apima visą tūrį ir aplenkia kliūtis (patenka į visas įmanomas vietas);
- galima atlikti pavienius „šūvius“ iki 1 litro vandens tūrio kas 2–3 s arba serijomis iki 0,25 litro;
- galima purkšti vandenį laistymui be „šūvių“;
- vandenį galima naudoti su putokšliu;
- efektyvus „šūvio“ atstumas – iki 10 m.

1.2. Esamų gaisrinių švirkštų naudojimo nedideliems židiniams gesinti analizė

Priešgaisrinės gelbėjimo tarnybos gaisrams gesinti tradiciškai naudoja 1–6 l/s našumo purkštuvinius švirkštus, kai vanduo gesinimui tiekiamas iš cisternos ar kito vandens šaltinio gaisriniu išcentrinio siurbliu pro sujungtas su švirkštais žarnas. Kad būtų užtikrinamas gesinimas, turi būti tiekiamas atitinkamas gesinimo vandens kiekis, adekvatus išsiskiriančiam šilumos kiekiui nuo degančio paviršiaus. Jeigu gesinimo vandens kiekis į degantį paviršių bus tiekiamas nepakankamai, tai gesinimas nevyks, nes nuolatos išsiskirs daugiau šilumos energijos, nei jos bus sugerta. Jeigu vandens bus tiekiamas per daug, tai nedalyvaujantis gesinime vandens kiekis paprasčiausiai nutekės nuo gesinamo paviršiaus. A tipo kietų produktų (LST EN 2) gaisruose išsiskiriantis karščio intensyvumas yra nuo 95 kJ/m²s (knygos), 245 kJ/m²s (mediena) iki 630 kJ/m²s (polistirenas) (Drysdel 1992). Įvertinant 1 l vandens savybes, teorinis gesinti tiekiamo vandens intensyvumas skaičiuojamas taip:

$$I = W/k, \quad (1.1)$$

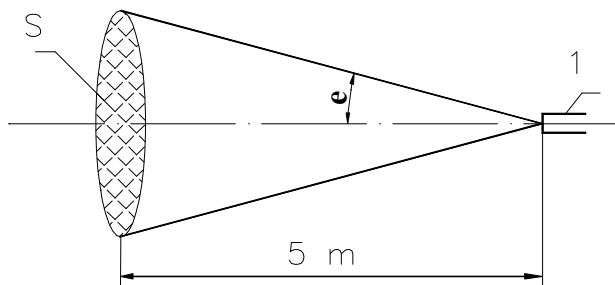
čia: I – tiekiamo gesinti vandens intensyvumas; W – energijos išsiskyrimo intensyvumas nuo 1 m^2 degančio paviršiaus ploto, $\text{kJ/m}^2\text{s}$; k – 1 litro vandens kiekio energijos sugėrimas, kai vanduo kaitinamas nuo 20°C iki 100°C ir išgarinamas, $k = 2571,2 \text{ kJ}$.

Atlikus skaičiavimus pagal (1.1) formulę, gaunami A tipo gaisruose degant kai kurioms medžiagoms tokie vandens tiekimo intensyvumai:

- knygoms – $0,037 \text{ l/m}^2\text{s}$,
- medienai – $0,095 \text{ l/m}^2\text{s}$,
- polistirenui – $0,245 \text{ l/m}^2\text{s}$.

Pagal šias reikšmes A tipo gaisruose gesinimo vandens tiekimo intensyvumo vidurkis sudaro $0,126 \text{ l/m}^2\text{s}$. Tai tas intensyvumas, kuris turėtų būti užtikrinamas gesinant nedidelius gaisro židinius.

Siekiant įvertinti naudojamų švirkštų efektyvumą ir jų galimybes naudojama vandens tiekimo intensyvumo nustatymo schema, parodyta 1.7 paveiksle.



1.7 pav. Vandens tiekimo intensyvumo pro švirkštus įvertinimo schema

Fig. 1.7. Evaluation chart of the water spraying intensity through the fire nozzles

Parenkami švirkštų dažniausiai naudojami režimo parametrai: čiurkšlės skleidimo kampai e – 0° (kompaktinė čiurkšlė), 15° ir 30° , čiurkšlės skerspjūvio plotas S – 5 m atstumu nuo švirkšto. Gauti duomenys pateikiami 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Gesinimo vandens tiekimo intensyvumo duomenys naudojant skirtingo našumo švirkštus bei čiurkšles

Table 1.1. Data of the water delivery intensity for extinguishing when using fire nozzles with different delivery capacities and streams

Čiurkšlės tipas, čiurkšlės skleidimo kampas α	Skerspjuvio plotas S , m^2	Gesinimo vandens tiekimo intensyvumas, l/m^2s					
		Švirkštai, kurių našumai, l/s					
		1	2	3	4	5	6
15°	5,64	0,17	0,35	0,53	0,71	0,89	1,06
30°	26,13	0,04	0,08	0,11	0,15	0,19	0,23
0° (kompaktinė)	0,11	9,09	18,18	27,27	36,36	45,45	54,54

Gautus gesinimo vandens tiekimo intensyvumo duomenis palyginus su reikalingo A tipo gaisruose vandens tiekimo į degančio paviršiaus plotą vidurkiu, galima spręsti apie įvairaus našumo švirkštų naudojimo efektyvumą. Jeigu vandens tiekimo intensyvumas viršija vidurkį, tai sudaromos galimybės neefektyviai vartoti vandenį, kai jo dalis nutekėtų negesindamas gaisro. Jeigu būtų priešingai, tai degantys objektai būtų gesinami neveiksmingai arba tai atlikti būtų neįmanoma. Pagal naudingai naudojamo gesinimo vandens kiekį, išreikštą procentais, galima spręsti apie pačių švirkštų ir jo čiurkšlių efektyvumą (1.2 lentelė).

1.2 lentelė. Tiekiamo pro švirkštus gesinimo vandens kiekio naudojimo efektyvumo duomenys, įvertinant reikalingą gesinti tiekimo intensyvumo vidurkį

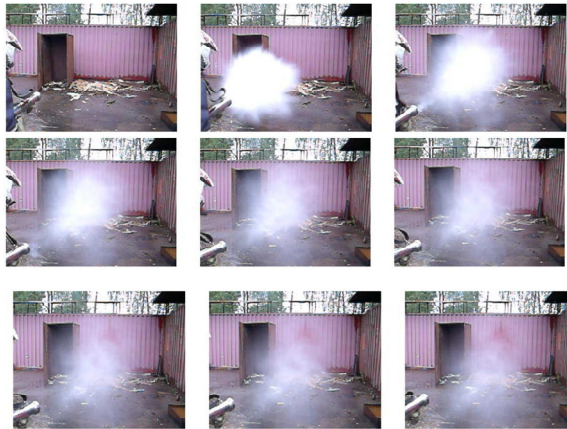
Table 1.2. Data of the water use efficiency through fire nozzles in accordance with required average intensity for extinguishing

Čiurkšlės tipas, čiurkšlės skleidimo kampas α	Naudingai naudojamas gesinti vandens kiekis, %					
	Švirkštai, kurių našumas, l/s					
	1	2	3	4	5	6
15°	74	36	24	18	14	12
30°	trūksta	trūksta	trūksta	84	66	55
0° (kompaktinė)	1,2	0,7	0,5	0,3	0,27	0,23

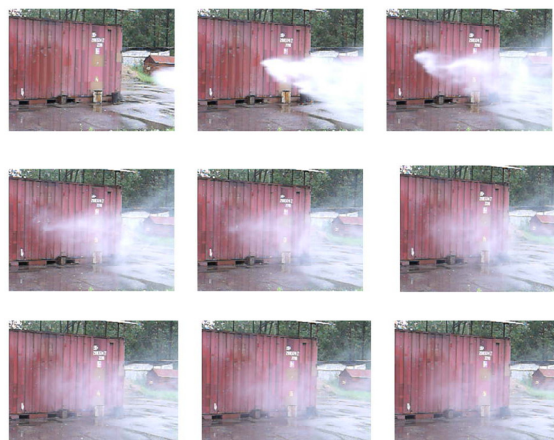
Gauti duomenys rodo, kad nedideliems židiniams gesinti naudojamų švirkštų efektyvumas nėra pakankamas. Ypač neefektyviai gesina kompaktinės čiurkšlės, kurios pateisinamos tik tais atvejais, kai reikia suardyti degančius paviršius arba tiekti vandenį didesniu atstumu. Nedideliems židiniams likviduoti labiausiai tinka kilnojamosios gesinimo priemonės, vandeniui išmesti naudojančios suslėgto oro energiją, ypač impulsiniai švirkštai (Suslavičius, Bogdevičius 2004).

Švedijoje naudojamų švirkštų parametų tyrimo analizė tai pat parodė, kad ne visi švirkštai sudaro optimalias vandens transportavimo sąlygas. Didinant gesinimo vandens transportavimo slėgį, galima labiau susmulkinti vandens čiurkšlę, padidinti efektyvumą, mažinant bendrą gesinimo vandens kiekio poreikį (Larson, Westerlund 2006).

Siekiant nustatyti jau esamo impulsinio švirkšto IFEX 3001 savybes, buvo atlikti eksperimentiniai „šūvio“ fazių tyrimai bei praktiniai bandymai. Purškiamo vandens fazės tirti buvo taikytas fotografinis metodas su 0,07 s intervalais tarp kadrų. Tyrimo metu gauti vaizdai parodyti 1.8 ir 1.9 paveiksluose.



1.8 pav. Purškiamo vandens judėjimo fazės
Fig. 1.8. Phases of the water spray movement



1.9 pav. Vandens čiurkšlės judėjimo ir skaidymosi fazės
Fig. 1.9. Phases of the water spray movement and decomposition

Esami impulsiniai švirkštai IFEX 3000 vieno impulso metu gali išstumti iki 1 l vandens, kuris pavirsta į lašo formos greitai judančio rūko debesį. 5 m atstumu nuo švirkšto rūko debesies maksimalus skersmuo D sudaro 3 m, vidutiniškai tenkantis vandens kiekis gesinimo paviršiaus plotui sudaro $0,142 \text{ l/m}^2$. Tačiau pagal technines švirkšto galimybes toks vandens kiekis gali būti tiekiamas tik 3 s intervalais, tai yra vandens tiekimo intensyvumas sudaro tik $0,047 \text{ l/m}^2\text{s}$. Toks vandens tiekimo intensyvumas yra gerokai per mažas efektyviam gesinimui, nors vandens gesinimo savybės dėl labai gero susmulkinimo išnaudojamos beveik 100 %. Taip pat gesinant nedidelius židinius, kai čiurkšlės skersmuo sudaro net 3 m, nėra efektyvus, nes dalis vandens nepatenka ant degančio paviršiaus. Kai kuriais atvejais nepakankamą gesinimo efektyvumą parodė ir atlikti bandymai Mančesterio priešgaisrinėje tarnyboje (Barker 1996).

Esamo švirkšto tyrimų metu nustatyta:

- išleista iš impulsinio švirkšto vandens čiurkšlė skaidosi į smulkius lašelius ir lėtėja, dalies vandens lašelių greitis tampa minimalus ir jie lieka laisvai sklęsti ore visame čiurkšlės judėjimo kelyje;
- greičiausiai vandens čiurkšlės lašeliai 10 m atstumą pasiekia jau per 0,35 s laiko tarpą;
- pagrindinė vandens čiurkšlės masė 10 m atstumą pasiekia per 0,7 s laiko tarpą.

Įvertinus esamų impulsinių švirkštų parametrus nustatyti tokie pagrindiniai trūkumai:

1. Gana nemažas švirkšto svoris (iki 8 kg), kuris labai apsunkina ugniagesio gelbėtojo greito manevravimo galimybes, o svoris su suslėgtojo oro ir vandens indais siekia net iki 35 kg.

2. Gana didelės švirkšto reakcijos jėgos vandens čiurkšlės paleidimo metu. Netinkamai laikantis švirkštą naudotojas gali net traumotis.

3. Gana ilgas švirkšto užpildymo laikas (2–3 s), t. y. laiko tarpas tarp čiurkšlių paleidimų, dėl ko neužtikrinamas reikiamas gesinimo vandens tiekimo į degantį paviršių intensyvumas. Dėl šių priežasčių kyla būtinybė naudoti du tokius švirkštus vienam židiniui gesinti.

4. Naudojant švirkštus uždaroje patalpoje (butuose) yra tikimybė, kad greitai lekiantys lašeliai, nepatekę tiesiogiai ant degančio paviršiaus, nespės sugerti šilumos ir atsitreks į sienas ar kitas patalpas ribojančias konstrukcijas, dėl ko labai mažėtų gesinimo efektyvumas.

5. Švirkšto veikimas nėra efektyvus atvirose vietovėse didesniais atstumais, nors didžiausias čiurkšlės atstumas siekia iki 16 m. Smulkiai išpurslintus lašelius išnešioja oro srautai. Įvertinus gautus rezultatus galima teigti, kad nedideliems gaisro židiniams gesinti, kurių aktualumas buvo aprašytas pirmiau, impulsinio švirkšto parametrai nėra optimalūs.

Impulsinio švirkšto, pritaikyto nedideliems židiniams gesinti, optimalių parametų prielaidos yra šios:

- nedideli židiniai praktiškai gesinami esant nedideliems atstumams nuo jų, todėl optimalus čiurkšlės veikimas ir vandens transportavimas turi būti užtikrintas 3–6 m atstumu;

- siekiant užtikrinti gesinimą vienu švirkštu ir gesinimo medžiagų tiekimo į židinius nepertraukiamumą, būtina išlaikyti ne mažesnę gesinimo medžiagų tiekimo našumą (tai yra 0,25–0,3 l/s) bei sumažinti švirkšto užpildymo laiką ir padidinti čiurkšlės paleidimo dažnį;

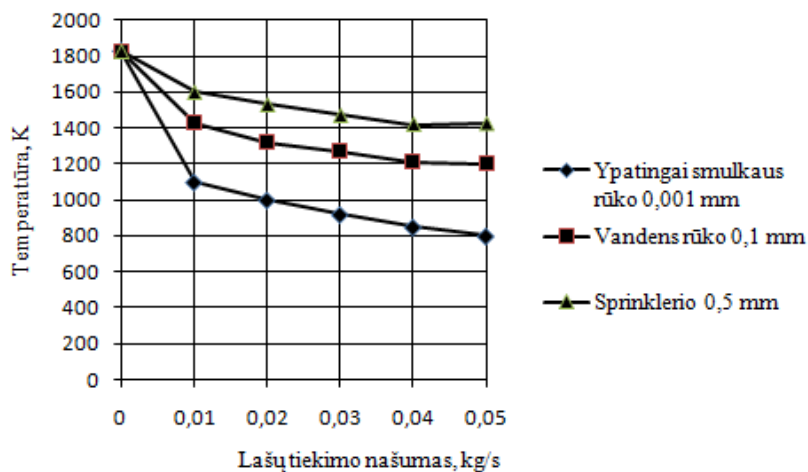
- sumažinti impulsinio švirkšto reakcijos jėgas mažinant vandens masę čiurkšlėje.

Kitose šalyse naudojamų švirkštų parametų tyrimo analizė taip pat parodo, kad ne visi švirkštai sudaro optimalias gesinimo vandens transportavimo sąlygas. Didinant gesinimo vandens transportavimo slėgį galima labiau susmulkinti vandens čiurkšlę, padidinti naudojamo gesinti vandens efektyvumą mažinant jo kiekio poreikį.

1.3. Gesinimo vandens rūku tyrimai

Ne vienoje šalyje vykdomi moksliniai tyrimai gesinimo vandens rūku. Viena šių tyrimų priežasčių yra ta, kad uždraudus naudoti chemines gesinimo priemones, tokias kaip Halon 1301 (*The Montreal Protocol*), būtina rasti joms pakaitalą. Halogenizuotos gesinimo medžiagos daugiausia buvo naudojamos tam tikriems agregatams, mechanizmams gesinti automatinėmis gesinimo sistemomis, įrengtomis laivuose, lėktuvuose, sudėtinguose mašinų kompleksuose bei kitose specialiose transporto priemonėse. Šios rūšies gesinimo medžiagų veikimo principas buvo pagrįstas oksidacijos reakcijos stabdymu ir priklausė inhibitorinių medžiagų grupei. Tačiau halogenizuotos medžiagos daro toksinį poveikį žmogui, o svarbiausia – ardo apsauginį Žemės ozono sluoksnį. Kita priežastis – siekis sumažinti gesinimo sistemų dydį, transportuojamo gesinimo skysčio kiekį, sumažinant sistemų įdiegimo ir naudojimo kainas (Mawhinney 2003).

Daugelis atliktų tyrimų parodė (Adiga, Robins 2006; Fleming, Awtry, Sheinson, Ayers 2005; Hart, Ren, Edwards 2003), kad labai gerų rezultatų gesinant gaisrus duoda vandens rūko, kuriame vandens lašeliai susmulkinami iki 10 µm skersmens ir mažesnius dydžius, naudojimas. Tokio vandens rūko lašeliai turi ypač gerų šilumos absorbavimo savybių, nes gaunamas gana didelis vandens paviršiaus plotas. Atliktų tyrimų duomenimis, vandens rūko šaldymo savybės priklausomai nuo lašelių dydžio ir vandens našumo parodytas 1.10 paveiksle.



1.10 pav. Vandens aušinimo savybių kitimas priklausomai nuo suskaidymo į lašelius dydžio

Fig. 1.10. Water cooling behavior depending on the fragmentation of the droplet size

Vandens gesinimo rūku, kurio lašelių dydis ne didesnis kaip $10\ \mu\text{m}$, geras savybes parodė lengvai užsidegančio heptano skysčio, degančio $0,3\ \text{m}$ skersmens paviršiuje, gesinimas. Jam užgesinti tereikėjo $100\ \text{ml}$ vandens, kuris heptaną užgesino per $10\ \text{s}$. Heptano gesinimas rūku parodytas 1.11 paveiksle.



1.11 pav. Heptano gesinimas vandens rūku

Fig. 1.11. Water mist fights the fire of the heptane

Kai kurie autoriai teigia, kad gesinimo vandens poreikis priklauso nuo jo tiekimo būdo ir optimaliausi rezultatai gaunami gesinant vandens rūku su lašeliais, kurių skersmenys mažesni nei 30 μm (Davis 2000).

Kitais tyrimais nustatyta, kad gesinimas rūku, kurio lašelių dydis neviršija 40 μm , pranoksta netgi gesinimą medžiaga Halon 1301. Taigi tyrimai parodė, kad gesinimas vandens rūku gali pakeisti kenksmingas halogenizuotas gesinimo medžiagas (Gameiro 1993), tačiau visi tyrėjai tvirtina, kad tyrimai nėra baigti ir juos būtina tęsti. JAV mokslininkai apskaičiavo, kad gesinimui, vietoje Halon 1301 naudojant vandens rūką, pakeisti kasmet reiks išleisti apie 2 mlrd. USD.

Tačiau labiausiai suinteresuota šiais tyrimais yra karinė pramonė, nes kariniuose laivuose, lėktuvuose, tankuose ir kitose specialios paskirties mašinose gaisrai daugiausia ir buvo gesinami haloninėmis medžiagomis. Todėl tokius tyrimus dažniausiai atlieka įvairios karinės laboratorijos arba pagal karinius užsakymus kitos institucijos (pvz., JAV karinis jūrų laivynas, MAI Žemųjų temperatūrų tyrimo institutas, NASA ir kt.). Kadangi gesinimą vandens rūku pirmiausia bandoma pritaikyti kariniuose objektuose, todėl didelė dalis tyrimų medžiagos yra viešai neprieinama. Nepaisant to, kad tyrimai nėra baigti, jau bandoma taikyti gesinimo vandens rūku būdą (Новосад, Попов 2009; Новые технологии пожаротушения 2010; HI-FOG for cruise ships 2008; H₂O³ Flexibility for industry 2009). „Marioff Corporation OY“ įmonė įdiegė kai kurių laivų mašinų skyriuose ir kajutėse gesinimo vandens rūku sistemas; tam tikros gesinimo vandens rūku sistemos įrengtos *British Petroleum* ir *Ginger Kerr* naftos gavybos platformose; nuo XX a. 9-ojo dešimtmečio vidurio britų karinis povandeninis laivynas pradėjo gesinti gaisrus vandens rūku, kurio lašelių dydis siekė iki 0,4 mm skersmens; Austrijos „Aquasys“ įmonė bandė gesinti vandens rūku 12 000 KVA elektros transformatorines.

Siekiant nustatyti vandens suskaidymą į smulkius lašelius su IFEX įranga, Australijos Kvinslando universitete buvo atlikti tyrimai naudojant lazerinius ir greito vaizdo fiksavimo skaitmeninius įrenginius (Hewitt, O'Donnell, Dorr, Woods 2006). Tyrimų metu nustatyta, kad su IFEX įranga gaunami lašeliai iki 30 μm .

Yra bandymų, naudojant įprastus gaisrinius išcentrinius siurblius, sukurti tokius švirkštus, pro kuriuos transportuojant vandenį vyktų išteklėjimas su kavitacija ir vanduo susiskaidytų į rūką (Karpenchuk 2006). Tačiau geresnių rezultatų galima gauti tik keičiant reologines gesinimo skysčių savybes naudojant papildomas vandens paviršiaus įtempimą mažinančias medžiagas ar putokšlius.

Gesinimo vandens rūku efektyvumas tyrimais yra patvirtintas, o jo sudarymo galimybės ir įrangos charakteristikos nėra gerai išnagrinėtos. Čiurkšlių, sudarančių vandens rūką, nagrinėjimas neįmanomas be vandens transportavimo įrangos ir juose vykstančių hidrodinaminių procesų tyrimų. Kai kurie atlikti tyrimai (Grosshandler 1994; Тычин 1997) turi trūkumų, nes nustato, kad tam tikro

transportuojamo vandens kiekio ištekėjimo pro švirkštus greitis nepriklauso nuo ištekėjimo angos skersmens, bet ištekėjimo laikas priklauso. Tai neatitinka realybės, nes tam tikro vandens kiekio ištekėjimo atitinkamomis sąlygomis laikas priklauso nuo ištekėjimo greičio. Vandens čiurkšlės greitis turi didelę įtaką vandens rūko sudarymui (Иваницкий 2008).

Analizė rodo, kad iki šiol nėra sudaryta matematinių modelių, apimančių visus hidrodinامينius procesus, vykstančius transportuojant vandenį impulsais, naudojant suslėgtojo oro energiją ir gaminant vandens rūką. Nėra įvertinamos transportuojamo ir susmulkinamo vandens gesinimo savybės bei jo įtaka įrangos parametrams.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Gesinimo priemonės, skirtos nedideliems gaisro židiniams likviduoti, yra ypač aktualios priešgaisrinėms gelbėjimo tarnyboms, nes jomis galima gerokai taupiau ir greičiau gesinti didelį gaisrų skaičių.

Gesinimo medžiagų (vandens) tiekimo būdai turi didelę įtaką efektyviam jų naudojimui. Kaip parodė atlikta apžvalga, šioje srityje dirbama taikant įvairius gesinimo medžiagų transportavimo į gaisro židinius būdus.

Remiantis atlikta analize galima daryti tokius apibendrinimus:

1. Šiuo metu nėra sukurti mobilių IHPGI, tinkančių nedideliems gaisro židiniams gesinti, matematiniai modeliai, apimantys visus vykstančius procesus jų darbo metu.

2. Gesinimo įranga nedideliems gaisro židiniams gesinti turi būti kilnojamoji, efektyviai išnaudojanti visas chemines ir fizines vandens savybes, užtikrinanti reikiamą vandens tiekimo intensyvumą, neturinti neigiamų poveikių jo naudotojams.

3. Parodyta, kad nedidelius židinius efektyviai gali gesinti įranga, naudojanti suslėgtojo oro energiją. Tačiau šiuo metu tyrimais nėra nustatytas jų tinkamumas nedideliems gaisro židiniams gesinti, nenustatyta jų sąveika su naudotojais.

Atsižvelgiant į apibendrinimus, suformuluoti pagrindiniai šio darbo teorinių ir eksperimentinių tyrimų uždaviniai:

- nustatyti siektinus smulkinto vandens parametrus, tinkamiausius nedideliems gaisro židiniams gesinti;
- atlikti gesinimo įrenginio, naudojančio suslėgtojo oro energiją, veikimo principo analizę ir konstrukcinę sintezę;
- sukurti hidraulinio ir pneumatinio racionalių parametrų gesinimo įrenginio matematinį ir fizinį modelius.

Siekiant įgyvendinti uždavinius, reikia:

- skaičiavimais nustatyti efektyviausius smulkinto vandens lašelių dydžius, įvertinus ir jų judėjimo greičius;
- atlikti hidraulinio ir pneumatinio gesinimo įrenginio (HPGI) dinaminių procesų tyrimą bei sudaryti jo veikimo matematinį modelį;
- sukurti HPGI eksperimentinius modelius ir ištirti jų veikimo savybes;
- atlikti HPGI atatrankos parametrų tyrimus.

Įrenginio dinaminių ir hidrodinaminių procesų teoriniai tyrimai

Siekiant sukurti racionalių parametrų gesinimo įrenginį, būtina nustatyti smulkinto vandens lašelių dydžių įtaką šiluminės energijos sugėrimui, įvertinant ir jų judėjimo greičius. Šioje dalyje nagrinėjamos vandens lašelių savybės ir jų reikšmė gesinimui, nustatomos optimalios jų reikšmės. IHPGĮ pagrindiniai parametrai bei procesų eiga nustatomi sprendžiant hidraulinių ir pneumatinių sistemų būsenų lygtis. Tam tikslui sudaromi IHPGĮ matematiniai modeliai. Tyrimai atliekami skysčių ir dujų judėjimo lygčių sprendimo charakteristikų metodu. Pateikiami racionalių parametrų gavimo būdai ir originalios konstrukcijos automatinio IHPGĮ veikimo principas. Nagrinėjamos IHPGĮ darbo metu atsirandančios atatrunkos jėgos bei jų priežastys, apžvelgtos IHPGĮ atatrunkos sudedamosios dalys ir skaičiavimo principai, nustatyti veiksniai, kurie daro įtaką IHPGĮ atatrunkos atsiradimui.

2.1. Teorinis vandens srauto skaidymo pagrindumas

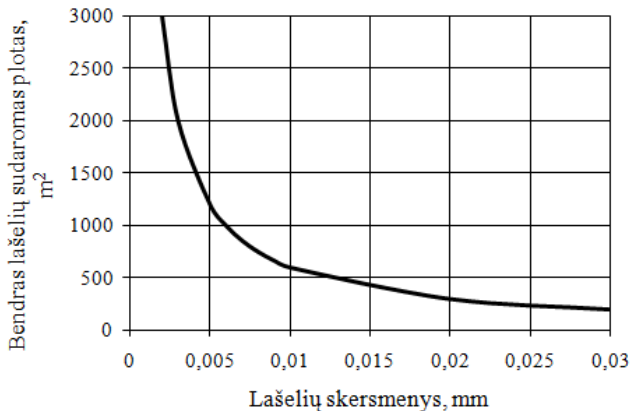
Nors faktinės vandens savybės sugerti šilumos energiją yra gana didelės, tačiau tas pats vandens kiekis, priklausomai nuo smulkinimo į atskirus lašelius,

turi skirtingus paviršiaus plotus. Akivaizdu, kad kuo labiau susmulkinsime vandenį, tuo didesnį paviršiaus plotą iš to paties jo tūrio gausime, kuris tiesiogiai galės kontaktuoti su gaisro karščiu ir tuo efektyviau bus išnaudojamos vandens savybės. Iš vieno litro tūrio smulkinto vandens gaunami atitinkamo dydžio lašeliai, jų skaičius bei sudaromas paviršių plotas pateikiamas 2.1 lentelėje ir 2.1 paveiksle.

2.1 lentelė. Iš 1 l vandens tūrio gaunamų lašelių skersmenys, jų skaičius ir bendras paviršiaus plotas

Table 2.1. Diameters, the number and total surface area of the droplets generated from 1 liter of water

Lašelių skersmuo, mm	Lašelių skaičius	Bendras plotas, m ²
0,3	$7,1 \times 10^7$	20
0,2	$2,4 \times 10^8$	30
0,03	$7,1 \times 10^{10}$	200
0,02	$2,4 \times 10^{11}$	300
0,003	$7,1 \times 10^{13}$	2000
0,002	$2,4 \times 10^{14}$	3000



2.1 pav. 1 litro vandens tūrio lašelių bendro paviršiaus ploto priklausomybė nuo jų skersmens dydžio

Fig 2.1. Total surface area of the water droplets dependence on their diameters which are generated from 1 liter volume

Šie duomenys sutinka su kitų autorių pateikiamais duomenimis (Davis 2000; Marioff 2006). Kai vanduo tiekiamas labai mažais lašeliais, galima beveik 100 % išnaudoti visas jo savybes. Be to, dėl vandens poveikio visiškai nebūtų

sugadinamas turtas ir vertybės, nesneužliejamos vandeniui negesinamos patalpos. Dėl suslėgtojo oro energijos susmulkinto vandens kiekio tam pačiam rezultatui pasiekti reikia net 80 % mažiau, nei tiekiant vandenį pro tradicinius purkštuvinius švirkštus (Noguchi, Okubo, Miyasaka 2000).

Skirtinga gesinimo įranga sudaro ir skirtingų dydžių vandens lašelių gesinimo srautus. Lašelių dydžiai ir iš jų sudaryti priešgaisrinėse gelbėjimo tarnybose skirstomi į 5 kategorijas: 1 – koloidiniai (mažesni nei 1 mikronas, kaip dūmas); 2 – dulkės (nuo 1 iki 10 mikronų, kaip jūros rūkas); 3 – smulkūs (nuo 10 iki 100 mikronų, kaip debesys ar migla); 4 – vidutiniai (nuo 100 iki 1000 mikronų, kaip dulksna); 5 – stambūs (nuo 1000 iki 10 000 mikronų, kaip stambių lašų lietus). Nurodomos tokios vandens srauto gesinimo savybės (Cone Angles 2008; Grant, Renton, Drysdal 2000; Zegers, Williams, Sheinson, Fleming 2000):

- Kuro aušinimas. Vykdomas degančio paviršiaus aušinimas, kuris sumažina pirolizės procesą ir degių dujų išsiskyrimą. Tai kartu sumažina ir bendrą gaisro metu išsiskiriančios šilumos energijos kiekį.

- Liepsnos aušinimas. Tiesioginis liepsnos zonos aušinimas sumažina laisvųjų radikalų koncentraciją. Dalis energijos suvartojama vandeniui kaitinti ir mažiau jos lieka reakcijai palaikyti. Tuo pagrįsti gesinimo vandens rūku ar migla metodai.

- Liepsnos izoliavimas. Sumažina deguonies dalinį slėgį dujose, o tai tolygu deguonies išstūmimui iš degimo zonos. Tuo pagrįstas didelių uždarų degančių erdvių gesinimas vandens rūku.

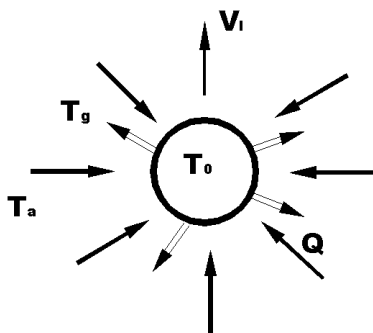
Taigi vandens gesinimo savybės pasireiškia šiluminės radiacijos mažinimu, gaisro dujų skiedimu ir cheminės reakcijos stabdymu.

Vanduo, kaip gesinimo medžiaga, teoriškai turi 2,6 MJ/kg aušinimo savybių: 0,3 MJ/kg vandens įkaitinimui nuo 20 °C iki 100 °C ir 2,3 MJ/kg vandens išgarinimui esant 100 °C. Tačiau naudojant tradicinius švirkštus ir metodus ši vandens savybė išnaudojama tik nuo 20 % iki 60 % (Grimwood 2005; Sardqvist 1996; Hadjisophocleus, Richardson 2005). Nustatyta, kad tiekiamo vandens šilumos perdavimo savybės priklauso nuo lašelių greičio ir jų skersmens (Kincaid, Longley 1989). Kuo didesnis lašelių greitis ir mažesnis skersmuo, tuo gaunamas didesnis šilumos perdavimo rodiklis. Pavyzdžiui, esant 2 mm skersmens lašelių nusėdimui 0,07 m/s greičiu (ramaus oro sąlygomis) šilumos perdavimo rodiklis sudaro 167 kWm², o tiems patiems lašeliams judant 2 m/s greičiu šilumos perdavimo rodiklis jau siekia 293 kWm². Jeigu 50 mikronų skersmens lašelių judėjimo greitį padidinsime nuo 0,01 m/s iki 0,5 m/s, tai šilumos perdavimo rodiklis padidės nuo 1,7 MWm² iki 2,5 MWm² (Firetactics 2008). Pagrindiniai veiksniai, turintys įtaką gesinimo vandens šilumos mainų rodikliams, yra (Svennson 2002):

- vandens lašelių skersmuo;
- vandens lašelių judėjimo greitis;

- aplinkos temperatūra;
- gesinamo paviršiaus temperatūra.

Siekiant patvirtinti išvardytus teiginius, toliau nagrinėjama lašelio sąveika su aplinka pagal 2.2 paveiksle schemą.



2.2 pav. Vandens lašo sąveikos su aplinka schema

Fig. 2.2. The diagram of the water drop interaction with the environment

Pateikiame vandens lašo šiluminio balanso lygtį (Багпатов 1969; Sirignano 2000):

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{Nu(Re)\lambda(T_a - T_g)}{D^2\rho_v} N, \quad (2.1)$$

čia: $\frac{dQ}{dt}$ – šilumos pokytis, reikalingas vandens lašeliams išgarinti; $Nu(Re)$ – Nuselto skaičius, priklausantis nuo Re dydžio; λ – dujų šiluminio laidumo koeficientas; T_a – aplinkos temperatūra; T_g – vandens lašelių garavimo temperatūra; D – vandens lašelio skersmuo; ρ_v – vandens tankis; N – vandens lašelių skaičius, gaunamas iš tam tikro vandens tūrio.

Gaunamų lašelių skersmenis galima išreikšti taip:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6V}{N\pi}}, \quad (2.2)$$

čia: V – vandens tūris, kurį susmulkinus gaunamas bendras lašelių N skaičius. Pakeitus (2.1) formulėje vandens lašelių skersmens dydį išraiška (2.2), gaunama tokia lygtis:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{Nu(Re)\lambda(Ta - Tg)}{\sqrt[3]{\frac{6V}{N\pi}}\rho_v} N$$

arba

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{Nu(Re)\lambda(Ta - Tg)N^{5/3}\pi^{2/3}}{6^{2/3}V^{2/3}\rho_v}. \quad (2.3)$$

Išskyrus gautos (2.3) lygties dėmenis ir pažymėjus juos raide c

$$c = \frac{Nu(Re)\lambda(Ta - Tg)\pi^{2/3}}{6^{2/3}V^{2/3}\rho_v}, \quad (2.4)$$

gaunama, kad

$$\frac{dQ}{d\tau} = cN^{5/3}.$$

Įvertinus c išraiškos priklausomybę nuo Re skaičiaus, kurio dydžiui turi įtakos lašelių judėjimo greitis v , gaunama tokia priklausomybė:

$$\frac{dQ}{dt} = c(Re, v)N^{5/3}. \quad (2.5)$$

Formulėse (2.1)–(2.5) gautos priklausomybės rodo, kad to paties vandens kiekio šilumos sugėrimo savybės auga didėjant iš šio kiekio gautų lašelių judėjimo greičiui bei lašelių skaičiaus laipsniu $5/3$ dydžiu.

Tačiau būtina nustatyti kraštines lašelių dydžių ribas. Per smulkūs vandens lašeliai gali greitai sugerti šilumos energiją ir išgaruoti nepasiekę gesinamo paviršiaus. Lašelių dydžiams nustatyti gali būti naudojama tokia formulė (Баранов 1969):

$$t_{i\dot{g}} = \frac{D\rho_v\Delta Q}{4Nu\lambda(Ta - Tg)}, \quad (2.6)$$

čia: $t_{i\dot{g}}$ – lašelio išgaravimo laikas; ΔQ – suvartojamas šilumos energijos kiekis vandens masės vienetui įkaitinti iki išgaravimo temperatūros. ΔQ skaičiuojamas taip:

$$\Delta Q = c_v(Tg - T_0), \quad (2.7)$$

čia: c_v – specifinis vandens šilumos imlumas masės vienetui įkaitinti vienu laipsniu; T_0 – pradinė vandens temperatūra.

Vandens lašo Nu koeficientas randamas pagal tokią lygtį:

$$Nu = 0,56 Re^{0,5}$$

arba

$$Nu = 0,56 \left(\frac{vD}{\nu_d} \right)^{0,5}, \quad (2.8)$$

čia: ν_d – dujų kinematinis klampumas; v – lašelių greitis.

Pakeitus (2.6) formulėje ΔQ ir Nu reikšmėmis, nurodytomis (2.7) ir (2.8) formulėse, bei išskyrus ieškomąjį lašelio skersmens dydį D , gaunama tokia lygtis:

$$D = \frac{v}{\nu_d} \sqrt{\frac{2,24 t_{i\dot{g}} \lambda (T_a - T_g)}{\rho_v c_v (T_g - T_0)}}. \quad (2.9)$$

Pagal gautą (2.9) formulę galima nustatyti kritinius tiekiamo gesinti vandens lašelių dydžius, kurie neišgaruotų nepasiekę gesinamo objekto.

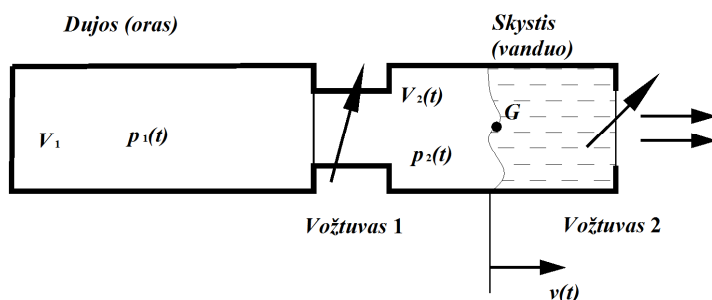
Įvertinus apžvalgoje nustatytus esamų impulsinių švirkštų trūkumus ir numatomas IHPGĮ naudojimo aplinkybes, teigiama, kad praktinis gesinimo atstumas iki 5 m, pradinis vandens čiurkšlės greitis siekia 120 m/s, vidutinis vandens lašelių judėjimo greitis sudaro 28,5 m/s, gaisro dujų poveikio pirmiesiems vandens lašeliams laikas 0,033 s (t. y. laikas, per kurį lašeliai neturėtų išgaruoti), nedidelių gaisro židinių temperatūra iki 700 °C, aplinkos (dujų) kinematinis klampumas $62,53 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, dujų šiluminio laidumo koeficientas 15 W/m²K, pradinė vandens temperatūra 20 °C, vandens specifinis šilumos imlumas $4,18 \times 10^3 \text{ J/kgK}$.

Atlikus skaičiavimus pagal pateiktą (2.9) formulę gaunamas 1,82 μm vandens lašelio skersmens dydis, t. y. vandens lašeliai su mažesniais skersmenimis bus jau neefektyvūs priimtomis sąlygomis. Naudojant suslėgtąjį orą vandeniui tiekti į gaisro židinius, gaunami 2–200 μm dydžio lašeliai (IFEX 3001. Impuls gun 2002; PYIT-1-0,4 2005). Naudojantis (2.9) formule galima parinkti tokias vandens lašelių transportavimo įrenginių charakteristikas, kurios užtikrintų lašelių patekimą ant degančių paviršių dar jiems neišgaravus. Tačiau parenkant gesinimo įrenginį konkrečiam objektui gesinti turi būti atsižvelgta ir į tokias sąlygas, kaip dujų srautų judėjimas ir ventiliavimas, nes per maži lašai gali neturėti gesinamojo poveikio (Liu 2000).

2.2. Įrenginio matematinis modelis

Įvertinus esamų IHPGĮ konstrukcines ir veikimo ypatybes, sudaromas 2.3 paveiksle pateiktas jo matematinis modelis.

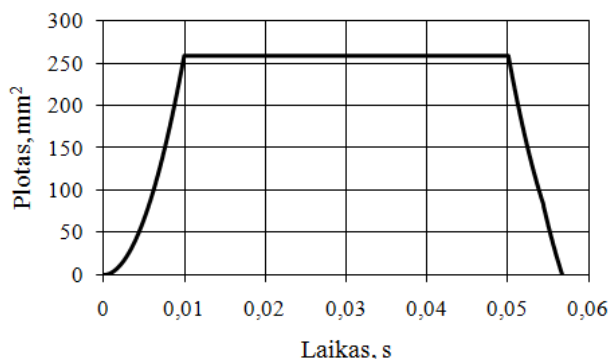
IHPGĮ matematinį modelį sudaro dvi kameros (suslėgtojo oro ir vandens) ir du vožtuvai. Pirmasis vožtuvas yra greitaveikis, antrasis diafragminis guminis vožtuvas atsidaro, kai pasiekiamas atitinkamas slėgis. Diafragminio vožtuvo gumos charakteristikos praktiškai nedaro įtakos vandens čiurkšlės savybėms (Иваницкий 2008).



2.3 pav. IHPGĮ matematinis modelis

Fig. 2.3. A mathematical model of the IHPED

Atsidarius greitaveikiam vožtuvui, antroje kameroje išskiriami du tūriai. Pirmame tūryje yra suslėgtojo oro veikimo slėgis, o antroje – slėgiamas suslėgtojo oro vanduo. Suslėgtojo oro kameroje oro slėgis $p_1(t)$ ir tūris V_1 . Pirmojo vožtuvo atsidarymo ploto dydis Sv_1 priklauso nuo laiko ir parodytas 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Greitaveikio vožtuvo atidaromo skerspjūvio ploto priklausomybė nuo laiko

Fig. 2.4. Dependence of cross-section area of the first valve on time

Atsidarius pirmajam vožtuvui antroje kameroje oro tūris yra $V_2(t)$ ir slėgis $p_2(t)$. Suslėgtasis oras ir vanduo atskiriami paviršiumi G. Pagal pirmąjį termodinamikos dėsnį visa judančių dujų šilumos energija naudojama vidinės energijos pasikeitimui bei darbui joms besiplečiant atlikti (Bogdevičius 2000a).

Slėgio kitimo lygtį, kai suslėgtojo oro kameros tūris pastovus ($V_1 = \text{const}$) (Bogdevičius 2000c; Bogdevičius, Suslavičius 2007b), galima užrašyti taip:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\gamma R T_1}{V_1} (G_{1in}(p_1) - G_{12}(p_1, p_2)), \quad (2.10)$$

čia: γ – specifinės šilumos koeficientas; R – dujų konstanta; $G_{1in}(p_1)$ – pripildomo oro masė; G_{12} – tekančio oro masė.

Tekančio oro masė G_{12} nustatoma pagal Sen-Venano ir Vencelio formulę (Bogdevičius 1997):

$$G_{12}(p_1, p_2) = \begin{cases} \mu_1 S_{v1}(t) K_1(T_1) p_1 \phi\left(\sigma = \frac{p_2}{p_1}\right), & \text{jeigu } p_1 \geq p_2, \\ \mu_1 S_{v1}(t) K_1(T_1) p_2 \phi\left(\sigma = \frac{p_1}{p_2}\right), & \text{jeigu } p_2 > p_1, \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\text{čia } K_1(T_1) = \sqrt{\left(\frac{2\gamma}{\gamma-1}\right) \frac{1}{RT_1}},$$

$$\phi(\sigma) = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{2}{\sigma^\gamma - \sigma^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}}\right)}, & \text{jeigu } \sigma_{cr} < \sigma \leq 1, \\ \sqrt{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}, & \text{jeigu } 0 < \sigma \leq \sigma_{cr}, \end{cases} \quad (2.12)$$

čia: μ_1 – išmetimo angos koeficientas; T_1 – temperatūra; $\phi(\sigma)$ – ikigarsinio ir garsinio tekėjimo funkcija; σ_{cr} – kritinio slėgio sąlyga, lygi $\sigma_{cr} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$.

Slėgio pasikeitimas antrame tūryje $V_2(t)$ išreiškiamas tokia lygtimi:

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{\gamma RT_1}{V_2(t)} (G_{12}(p_1, p_2) - G_{23}(p_2)) - \frac{\gamma p_2}{V_2(t)} \frac{dV_2}{dt}, \quad (2.13)$$

čia: $V_2(t) = V_{20} + Sx_G$; V_{20} – pradinis tūris; S – skerspjūvio plotas; x_G – paviršiaus G koordinatė,

$$G_{23}(p_2) = \begin{cases} G_{23}^*(p_2), & \text{jeigu } x_G > L_2 \\ 0, & \text{jeigu } x_G \leq L_2 \end{cases},$$

$$G_{23}^*(p_2) = \begin{cases} \mu_2 S_{v2}(p_2) K_1(T_1) p_2 \Phi\left(\sigma = \frac{p_\infty}{p_2}\right), & \text{jeigu } p_2 \geq p_\infty, \\ \mu_2 S_{v2}(p_2) K_1(T_1) p_\infty \Phi\left(\sigma = \frac{p_2}{p_\infty}\right), & \text{jeigu } p_\infty > p_2. \end{cases}$$

Visa skysčio (vandens) masė imama kaip vienalytė, kurio visos dalys juda vienodu vidutiniu greičiu. Greitis ir slėgis priklauso nuo išilginių koordinatčių ir laiko. Judant skysčiui atsiranda slėgio kritimo ir augimo bangos, kurios sklinda nuo jų kitimo vietos skersine kryptimi ir deformuoja vamzdino sienelės. Klampių ir spūdzių skysčių, slėgiamų vamzdyne, tekėjimo vientisumo lygtys turi tokias išraiškas (Bogdevicius 1991, 1997, 1999):

$$\frac{\partial}{\partial t} [S(x)\rho] + \frac{\partial}{\partial x} [S(x)\rho v] = F_1(x), \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [S(x)\rho v] + \frac{\partial}{\partial x} [S(x)(p + \rho v^2)] = F_2(p, v), \quad (2.15)$$

čia ρ – skysčio tankis.

Skysčio tekėjimo vientisumo lygtis gali būti pateikta kaip kvazitiesinė diferencialinė lygtis:

$$[A] \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} \right\} + [B] \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} \right\} = \{f\}, \quad (2.16)$$

$$\text{čia } [A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$[B] = \begin{bmatrix} v & a^2 \rho \\ \frac{1}{\rho} & v \end{bmatrix},$$

$$\{u\}^T = [p, v], \quad (2.17)$$

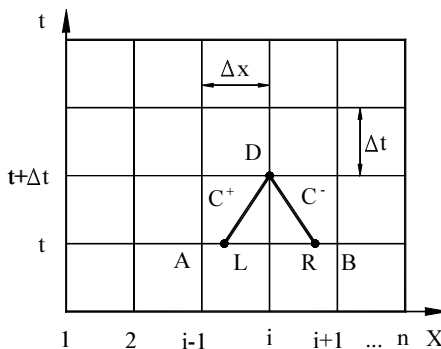
čia: v ir p – atitinkamai skysčio tekėjimo greitis ir slėgis; a – garso sklaidimo tampriojo vamzdyno skystyje, kuriame yra tam tikras kiekis dujų.

Garso greitis randamas pagal tokią lygtį:

$$a = \sqrt{\frac{K(p)/\rho}{1 + \frac{K(p) \cdot d}{E \cdot e} + \frac{\varepsilon}{\gamma} \left[\frac{K(p)}{\gamma p} - 1 \right]}}, \quad (2.18)$$

čia: $K(p)$ – skysčio tūrinio tamprumo modulis; E – vamzdyno tamprumo modulis; d – vidinis vamzdyno skersmuo; e – vamzdyno sienelių storis; γ – adiabatinio proceso indeksas; ε – dujų kiekio skystyje ir bendro skysčio kiekio santykis.

Skysčio tekėjimo vamzdžiu diferencialinės lygtys sprendžiamos charakteristikų metodu (Bogdevičius, Prentkovskis 2003). Pagrindinė charakteristikų metodo mintis ta, kad nežinomas skysčio kintantis greitis ir slėgis esamu momentu $t + \Delta t$ priklauso nuo šių parametų konkrečiu laiko momentu. Skysčio srauto parametų nustatymo schema pateikta 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Taške D skysčio srauto parametų nustatymo schema
Fig. 2.5. Circuit of liquid parameters determination of the point D

Prilyginę matricos (2.2.8) lygties determinantą nuliui, gauname lygtį:

$$\left| [B] - [A] \frac{dx}{dt} \right| = 0, \quad (2.19)$$

iš kurios galima surasti dx/dt išvestinę, kuri nustato charakteristikos kryptį. Jeigu ši lygtis turi n skirtingų realių šaknų $dx/dt = \lambda_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), tai pradinė diferencialinių lygčių sistema vadinama hiperbolinio tipo. Charakteristikos lygtinės posvyris λ_i priklauso ne tik nuo koordinačių, bet ir nuo $\{u\}$ sprendinio.

Įrašius iš (2.17) $[A]$ ir $[B]$ matricų išraiškas į (2.19) lygtį ir ją išsprendus, gaunamos dvi charakteristikų lygtys:

$$C^+ : \frac{dx}{dt} = v + a \text{ ir } C^- : \frac{dx}{dt} = v - a. \quad (2.20)$$

Iš šių charakteristikų suderinamumo sąlygų (Bogdevicius 2000; Aladjev, Bogdevicius 2001; Aladjev, Bogdevičius, Prentkovskis 2002; Aladjev, Bogdevičius 1999) gaunama:

$$C^+ : \frac{dv}{dt} + \frac{1}{a\rho} \frac{dp}{dt} = \frac{f_1}{a\rho} + f_2, \quad (2.21)$$

$$C^- : \frac{dv}{dt} - \frac{1}{a\rho} \frac{dp}{dt} = -\frac{f_1}{a\rho} + f_2, \quad (2.22)$$

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\frac{\tau \Pi(x)}{S(x)\rho} - a_x \end{Bmatrix}, \quad (2.23)$$

čia: $\Pi(x)$ ir $S(x)$ – vamzdžio perimetras ir skerspjūvio plotas; a_x – pagreitis išilgai vamzdžio; τ – vamzdžio vidinio paviršiaus kirpimo įtempiai.

Greitis ir slėgis laiko momentu taške D išreiškiamas netiesinių algebrinių lygčių sistema:

$$\begin{aligned} C^+ : \Phi_1 &= v_D - v_E + \frac{1}{2}(p_D - p_E)[r_{1E} + r_{1D}] - \frac{\Delta t}{2}[r_{2E} + r_{2D}] - \\ &\frac{\Delta t}{2}[r_{3E} + r_{3D}] = 0, \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$C^-: \Phi_2 = v_D - v_R - \frac{1}{2}(p_D - p_R)[r_{1R} + r_{1D}] + \frac{\Delta t}{2}[r_{2R} + r_{2D}] - \frac{\Delta t}{2}[r_{3R} + r_{3D}] = 0, \quad (2.25)$$

$$\text{čia: } r_1 = \frac{1}{\rho a} \quad r_1 = \frac{1}{\rho a}; \quad r_2 = -a^2 \rho v \frac{dS}{dx} / S; \quad r_3 = -a_x - \frac{\Pi \lambda(\text{Re}) v |v|}{8S},$$

$$\lambda(\text{Re}) = \begin{cases} \frac{75}{\text{Re}}, & \text{kai } \text{Re} \leq 2320, \\ \frac{0,31464}{\text{Re}^{0,25}}, & \text{kai } \text{Re} > 2320, \end{cases} \quad (2.26)$$

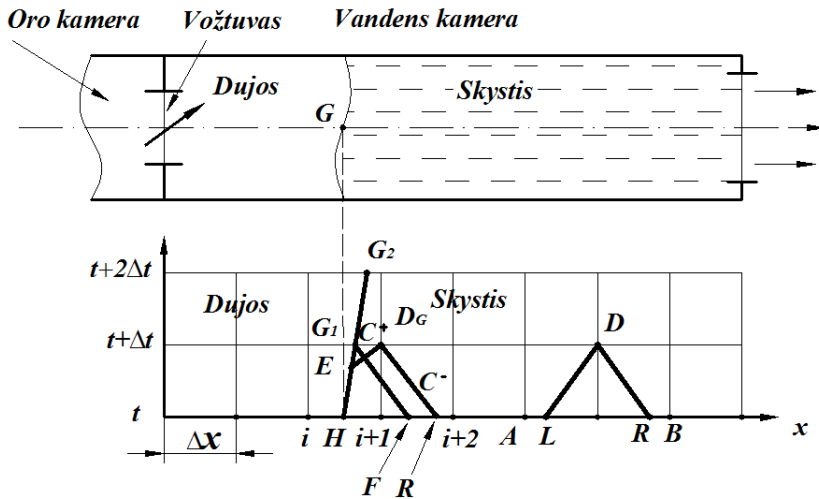
$\lambda(\text{Re})$ – koeficientas, įvertinantis slėgio nuostolius išilgai vamzdžio.

Lygčių sistema (2.24) ir (2.25) išsprendžiama Niutono metodu:

$$[J]_i \{\Delta Y\}_i = -\{\Phi(Y)\}_i, \quad (2.27)$$

$$\text{čia: } \{Y\}^T = [p_D, v_D]; \quad \{\Phi\}^T = [\Phi_1, \Phi_2].$$

Dujų (oro) potencinė energija iš suslėgtojo oro tūrio transformuojama į kinetinę skysčio energiją. Dujų ir skysčio sąveikos modeliavimo tikslumui nustatoma sąveikos schema, parodyta paveiksle 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Dujų ir skysčio sąveikos schema

Fig. 2.6. A schematic view of the interaction between gas and liquid

Taške G skysčio slėgis ir greitis nustatomi iš lygčių (2.24) ir (2.25).

$$C^+ : \Phi_1 = v_D - v_E + \frac{1}{2}(p_{DG} - p_E)[r_{1E} + r_{1D}] - \frac{\Delta t}{2}[r_{2E} + r_{2D}] - \frac{\Delta t}{2}[r_{3E} + r_{3D}] = 0, \quad (2.28)$$

$$C^- : \Phi_2 = v_D - v_R - \frac{1}{2}(p_{DG} - p_R)[r_{1R} + r_{1D}] + \frac{\Delta t}{2}[r_{2R} + r_{2D}] - \frac{\Delta t}{2}[r_{3R} + r_{3D}] = 0, \quad (2.29)$$

čia r_1 , r_2 ir r_3 išraiškos kaip nurodytos (2.24) ir (2.25) lygtyse.

Sudarytas matematinis modelis įvertina IHPGĮ suslėgtojo oro ir skysčio sąveiką, slėgio bangų sklidimą skystyje ir vandens transportavimo sąlygas.

2.3. Automatinio įrenginio pagrįstumas ir jo dinaminių bei hidrodinaminių procesų modeliavimas

Šioje dalyje nagrinėjami būdai reikiams IHPGĮ parametrams pasiekti. Laikomasi prielaidos, kad naujų charakteristikų IHPGĮ taikomas nedideliems gaisro židiniams gesinti, kurių likvidavimo aktualumas pateiktas apžvalgoje. Kuriami reikalingi mechanizmai reikiamam IHPGĮ darbingumui užtikrinti.

Siekiant užtikrinti efektyvų gesinimą, viena svarbiausių užduočių – gauti ne mažesnę kaip $0,126 \text{ l/m}^2\text{s}$ gesinimo medžiagų (vandens) tiekimo intensyvumą $3\text{--}5 \text{ m}$ atstumu nuo įrenginio, o tai kaip tik atitinka nedidelių gaisro židinių gesinimo sąlygas. Kaip jau buvo nustatyta, šiuo metu naudojami impulsiniai gesinimo įrenginiai 5 m atstumu sudaro 3 m skersmens rūko debesį ir vidutiniškai gesinimo vandens kiekis gesinamo paviršiaus plotui sudaro $0,142 \text{ l/m}^2$, tačiau tiekiamas 3 s laiko intervalais. Dėl to gesinti tiekiamo vandens intensyvumas sudaro tikrai $0,047 \text{ l/m}^2\text{s}$, t. y. $2,7$ karto mažesnis nei reikalingas. Įvertinant tai, kad impulsinių gesinimo įrenginių vandens smulkinimas yra pakankamas, reikiamą gesinimo medžiagų intensyvumą galima pasiekti dviem būdais:

- mažinti susmulkinto vandens rūko debesies skersmenį, t. y. koncentruojant vandens srautą;
- didinti tiekiamo vandens kiekį laiko atžvilgiu.

Pirmuoju atveju rezultatas gali būti nesunkiai pasiekiamas sumažinus IHPGĮ vamzdžio skersmenį. Pavyzdžiui, sumažinus 5 m atstumu vandens rūko skers-

menį pusiau, tomis pačiomis sąlygomis būtų gautas tiekimo intensyvumas jau $0,189 \text{ l/m}^2\text{s}$, t. y. didesnis nei reikėtų. Bet tai būtų neracionalu, nes reikėtų ilginti įrenginio vamzdį, o tiekiamo vandens būtų perteklius. Faktinis vandens tiekimo intensyvumas nustatomas tokia formule (Иванников, Ключ 1987):

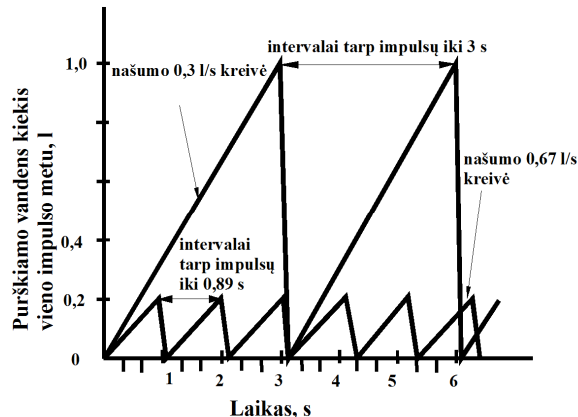
$$I = \frac{V_v}{t_{\text{ges}} S}, \quad (2.30)$$

čia: I – vandens tiekimo intensyvumas; V_v – suvartoto vandens kiekis; t_{ges} – gesinimui sugaištas laikas; S – gesintas plotas.

Tam pačiam 1,5 m skersmens vandens rūko debesiui sudaryti ir tenkinti intensyvumo sąlygą, užtenka „šūvio“ metu tiekti tikrai $0,67 \text{ l}$ vandens. Bet mažesniam vandens kiekiui tiekti reikia ir trumpesnio laiko įrenginiui parengti.

Antruoju atveju didinti vandens tiekimo intensyvumą galima trumpinant laiko intervalus tarp „šūvių“. Tačiau tai praktiškai neįmanoma atlikti nemažinant vandens ir suslėgtojo oro kamerų apimčių. Akivaizdu, kad mažinant „šūvio“ metu išmetamo vandens kiekį, bet padidinus jų dažnį galima pasiekti gerų HPGĮ veikimo parametų. Pavyzdžiui, to paties 1,5 m skersmens vandens rūkui sudaryti „šūviui“ naudojant po $0,2 \text{ l}$ vandens ir tenkinti gesinimo sąlygas būtina, kad laiko intervalai tarp vandens išmetimų būtų ne ilgesni kaip $0,89 \text{ s}$.

Taigi, paleidžiant vieno „šūvio“ metu mažesnius vandens kiekius, bet padidinus jų dažnius, galima pasiekti geresnių IHPGĮ naudojimo parametų. 2.7 paveiksle iliustruojama, kaip esant mažesnėms, bet dažnesnėms vandens išmetimo porcijoms gesinimo medžiagų laiko atžvilgiu tiekiama netgi daugiau.



2.7 pav. Vandens tiekimo priklausomybė nuo išmetimo dažnių
Fig. 2.7. Water supply dependence of the emission spectrum

Tačiau didesniu dažniu, kad ir mažesnėmis porcijomis, išmetant vandenį būtina sukurti naują suslėgtojo oro ir vandens srautų valdymo mechanizmą, veikiantį automatinio režimu

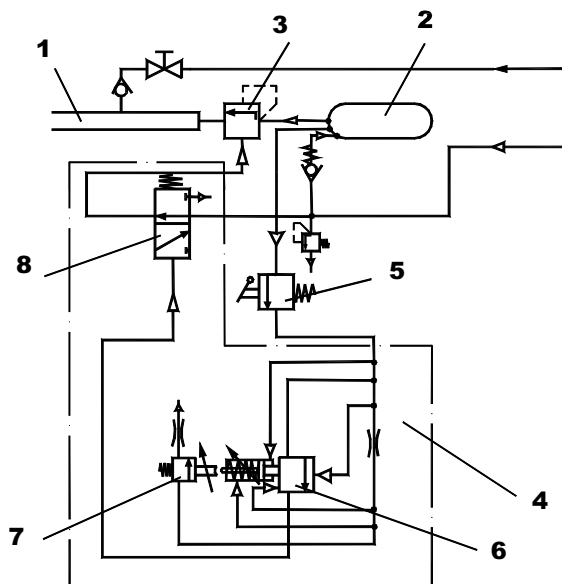
Su šiuo metu naudojamais IHPGĮ vandeniui išstumti būtina atlikti kai kurias operacijas:

- turi būti atidarytas suslėgtojo oro rezervuaro čiaupas, kuris pro reduktorių automatiškai papildo IHPGĮ suslėgtojo oro kamerą;
- prieš kiekvieną „šūvį“ atidaromas ir uždaromas vandens čiaupas ir pripildoma vandens kamera;
- nuspaudžiamas IHPGĮ paleidimo nuleistukas.

Sumažinus vamzdžio skersmenį, t. y. sumažinus išmetamo vandens kiekį, bet padidinus vandens išmetimo dažnį, IHPGĮ operatorius jau nespėtų atlikti šių veiksmų ir negalėtų skirti reikiamo dėmesio gesinimui, o ne įrenginio valdymui. Todėl kuriamas automatinis valdymo mechanizmas.

Automatinis valdymo mechanizmas, nuspaudus IHPGĮ paleidimo nuleistuką, turi užtikrinti automatinį įrenginio užtaisymą ir vandens išpurškimą reikiamu dažniu.

Sukuriamas automatinio valdymo mechanizmas, kurio struktūrinė schema pateikta 2.8 paveiksle. (Bogdevičius, Suslavičius, Lietuvoje registruotas patentas Nr. LT 5436 B; Suslavičius, Bogdevičius 2008; Bogdevičius, Suslavičius 2007a; Croser 1989).



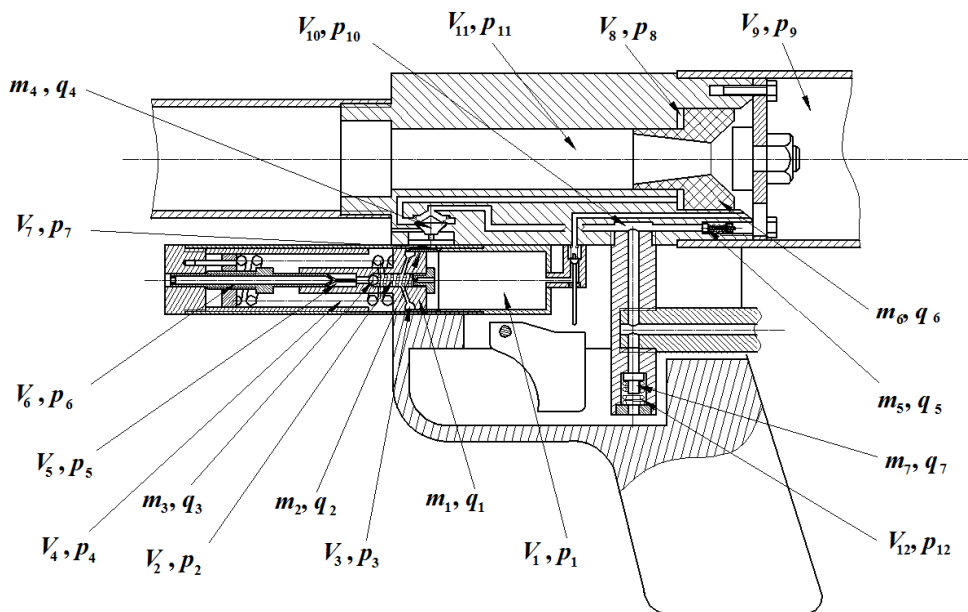
2.8 pav. Struktūrinė automatinio IHPGĮ valdymo schema

Fig. 2.8. A structural diagram of the automatic IHPED control system

Automatinio valdymo IHPGĮ sudaro vandens kamera (1), suslėgtojo oro kamera (2), greitojo veikimo vožtuvas (3), greitojo veikimo vožtuvo automatinio valdymo mechanizmas (4), suslėgtojo oro ir vandens šaltiniai. Vandens kamera (1) pildoma iš vandens šaltinio ar rezervuaro, suslėgtojo oro kamera (2) – iš suslėgtojo oro šaltinio ar rezervuaro. Atsidarius greitaveikiam vožtuvui (3), sujungiamos vandens (1) ir suslėgtojo oro (2) kameros. Plėsdamasis oras išstumia vandenį iš vandens kameros (1), dėl kurio vandens čiurkšlė susmulkinama į mažus lašelius. Aktyvavus greitaveikio vožtuvo automatinio valdymo mechanizmą (4), procesas nuolatos kartojamas ir vandens čiurkšlės išstumiamos serijomis. Automatinis IHPGĮ veikia užpildant vandens kamerą 1 iš atskiro vandens šaltinio ar rezervuaro, o suslėgtojo oro kamerą 2 – iš atskiro suslėgtojo oro šaltinio ar talpyklos. Perjungus vožtuvą 5 į veikimo padėtį aktyvuojamas greitaveikio vožtuvo 3 automatinio valdymo reguliuojamo mechanizmo 4 darbas. Dirbant greitaveikio vožtuvo automatinio valdymo reguliuojamam mechanizmui, užtikrinamas periodinis greitaveikio vožtuvo atsidarymas ir užsidarymas tol, kol vožtuvas 5 bus išlaikomas darbinės padėties.

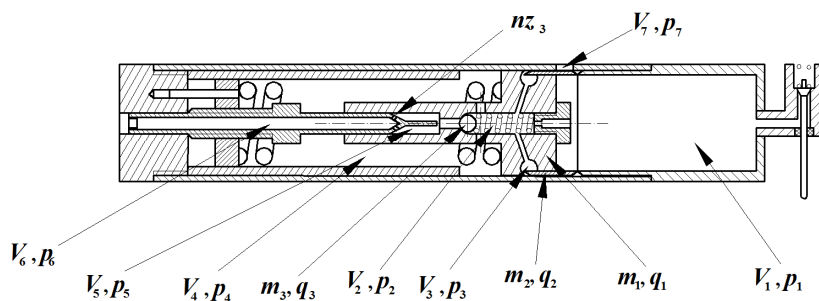
Automatinio valdymo mechanizmą 4 sudaro reguliuojamo valdymo vožtuvai 6 ir 7 bei greitaveikio vožtuvo 3 padėties perjungimo vožtuvas 8. Vožtuvas 6 turi reguliuojamą spyruoklę, o vožtuvas 7 – reguliuojamos padėties kumštelį. Vožtuvai 6 ir 7 per valdomą vožtuvą 8 užtikrina greitaveikio vožtuvo 3 atsidarymą ir užsidarymą reikiamu metu. Periodiškai atsidarant ir užsidarant greitaveikiam vožtuvui 3 vanduo impulsais išstumiamas iš vandens kameros 1.

Parenkant reikiamų parametrų vandens kamerą 1 bei reguliuojant greitaveikio vožtuvo automatinio valdymo mechanizmo 4 darbą, kuris nustatomas keičiant vožtuvo 6 spyruoklės įveržimą bei vožtuvo 7 kumštelio padėtį, nedidelių gaisro židinių gesinimo savybės tampa optimaliausios, užtikrinamas pakankamas vandens tiekimo intensyvumas, sumažinamas bendras hidraulinio ir pneumatinio švirkšto svoris bei atitrūkimas, nes vandens išmetama mažiau, tačiau dažniau. Siekiant užtikrinti automatinį vandens išstūmimą pagal 2.8 paveiksle parodytą schemą sudaromas greitaveikio vožtuvo automatinio valdymo reguliuojamo mechanizmo dinaminis modelis. Automatinis IHPGĮ dinaminis modelis parodytas 2.9 ir 2.10 paveiksluose, kuriuose nurodytos veikimo masės m_i ir jų poslinkiai q_i , ertmių tūriai V_i ir juose pasiekiami slėgiai p_i . A priede pateikiama automatinio IHPGĮ dinaminio modelio schema ir jo sudėtinių dalių žymėjimas, atitinkantis principinės automatinio IHPGĮ valdymo schemos žymėjimus, bei vertinamų masių vaizdai.



2.9 pav. Automatinio IHPGĮ dinaminio modelio schema

Fig. 2.9. The dynamic model of the automatic IHPED



2.10 pav. Automatinio IHPGĮ dinaminio modelio greitaveikio vožtuvo automatinio valdymo mechanizmo schema

Fig. 2.10. The automatic control device of the fast response valve scheme of the automatic IHPED

Siekiant atlikti automatinio IHPGĮ dinaminių ir hidrodinaminių procesų modeliavimą surašomos jo masių judėjimo ir slėgio kitimo darbinėse erdmėse lygtys.

Vadovaujantis antruoju Niutono dėsniumi surašomos tokios automatinio IHPGĮ masių judėjimo lygtys:

Pirmos masės (m_1):

$$m_1 \ddot{q}_1 = p_1 (S_{21} - S_{12}) - p_4 (S_{17} - S_{111}) - k_1 (q_1 + q_{10}) - F_{lr12} \operatorname{sgn}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) - F_{lr10} \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) - F_1(q_1), \quad (2.31)$$

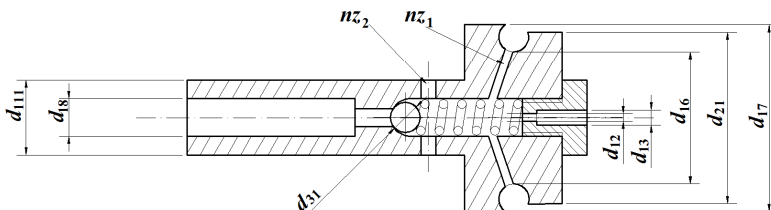
čia: $(S_{21} - S_{12})$ ir $(S_{17} - S_{111})$ – plotai, kuriuos veikia atitinkami slėgiai;

$$S_{21} = \frac{\pi d_{12}^2}{4}; \quad S_{12} = \frac{\pi d_{21}^2}{4} \quad S_{12} = \frac{\pi d_{21}^2}{4}; \quad S_{17} = \frac{\pi d_{17}^2}{4} \quad S_{17} = \frac{\pi d_{17}^2}{4};$$

$$S_{111} = \frac{\pi d_{111}^2}{4} \quad S_{111} = \frac{\pi d_{111}^2}{4}; \quad k_1 - m_1 \text{ masę veikiančios spyruoklės standumo koeficientas; } q_{10} - \text{pirmą masę veikiančios spyruoklės įvarža; } F_{lr12} - \text{trinties jėga tarp pirmos ir antros masės; } F_{lr10} - \text{trinties jėga tarp pirmos masės ir automatinio valdymo mechanizmo korpuso; } \operatorname{sgn} - \text{ženklų funkcija; } F_1(q_1) - \text{jėgos dedamoji, priklausanti nuo pirmoje masėje esančios trečios masės (rutulinio vožtuvo) judesio ir ją įveržiančios spyruoklės charakteristikų ir}$$

$F_1(q_1) = \begin{cases} 0, & \text{kai } q_1 \leq L_1 - L_3, \\ k_2 [q_1 - (L_1 - L_3) + q_{30} + q_3], & \text{kai } q_1 > L_1 - L_3, \end{cases}$

L_1 ir L_3 – atitinkamai pirmos ir trečios masės eigos dydis; k_2 – trečios masės (rutulinio vožtuvo) spyruoklės standumo koeficientas; q_{30} – trečios masės spyruoklės įvarža; d_i – masių kūnų skersmenys pateikti 2.11–2.16 paveiksluose.



2.11 pav. Pirmos ir trečios masių skersmenų išdėstymas

Fig. 2.11. Diameters location of the mass 1 and 3

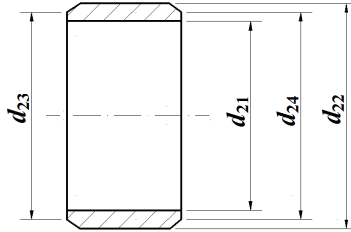
Antros masės (m_2):

$$m_2 \ddot{q}_2 = p_1 S_1(q_2) - p_3 S_2(q_1, q_2) + F_{tr12} \operatorname{sgn}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) - F_{tr20} \operatorname{sgn}(\dot{q}_2), \quad (2.32)$$

čia: $S_1(q_2) = \frac{\pi(d_{24}^2 - d_{21}^2)}{4}$, kai $q_2 = 0$ ir $S_1(q_2) = \frac{\pi(d_{22}^2 - d_{21}^2)}{4}$, kai $q_2 > 0$;

$$S_2(q_1, q_2) = \begin{cases} \frac{\pi(d_{23}^2 - d_{21}^2)}{4}, & \text{kai } q_1 = q_2, \\ \frac{\pi(d_{22}^2 - d_{21}^2)}{4}, & \text{kai } q_2 < q_1, \end{cases}$$

F_{tr12} – trinties jėga tarp pirmos ir antros masės kūnų; F_{tr20} – trinties jėga tarp antros masės kūno ir automatinio valdymo mechanizmo korpuso.



2.12 pav. Antros masės skersmenų išdėstymas
Fig. 2.12. Diameters location of the mass 2

Trečios masės:

$$m_3 \ddot{q}_3 = -p_2 S_{31} - F_{tr30} \operatorname{sgn}(\dot{q}_3) - F_3(q_1, q_3), \quad (2.33)$$

čia: $S_{31} = \frac{\pi d_{31}^2}{4}$, $S_{31} = \frac{\pi d_{31}^2}{4}$; F_{tr30} – trinties jėga tarp trečios ir pirmos masės kūnų; $F_3(q_1, q_3)$ – jėgos dedamoji, priklausanti nuo įveržiančios spyruoklės charakteristikų ir masių judesių

$$F_3(q_1, q_3) = \begin{cases} k_2(q_{30} + q_3), & \text{kai } 0 \leq q_1 \leq L_1 - L_3, \\ k_2\{q_{30} + q_3 + [q_1 - (L_1 - L_3)]\}, & \text{kai } L_1 - L_3 < q_1. \end{cases}$$

Ketvirtos masės:

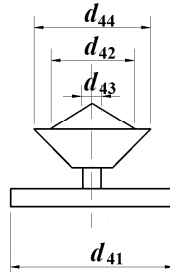
$$m_4 \ddot{q}_4 = p_7 S_{41} - k_3(q_{40} + q_4) - F_{tr40} \operatorname{sgn}(\dot{q}_4) - F_4(p_8, p_{10}) \quad (2.34)$$

čia: $S_{41} = \frac{\pi d_{41}^2}{4}$, $S_{41} = \frac{\pi d_{41}^2}{4}$; $k_3 - m_4$ masę veikiančios spyruoklės standumo koeficientas; q_{40} – ketvirtą masę veikiančios spyruoklės įvarža; F_{tr40} – trinties jėga tarp ketvirtos masės kūno ir greitaveikio vožtuvo korpuso,

$$F_4(p_8, p_{10}) = \begin{cases} p_{10} S_{44}, & \text{kai } q_4 < L_4, \\ p_{10} S_{43} - p_8 S_4, & \text{kai } q_4 = L_4, \end{cases}$$

L_4 – ketvirtos masės eigos dydis; $S_{44} = \frac{\pi d_{44}^2}{4}$;

$$S_4 = \frac{\pi(d_{44}^2 - d_{42}^2)}{4}, \quad S_4 = \frac{\pi(d_{44}^2 - d_{42}^2)}{4}; \quad S_{43} = \frac{\pi d_{43}^2}{4}.$$



2.13 pav. Ketvirtos masės skersmenų išdėstymas

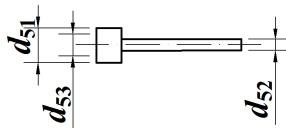
Fig. 2.13. Diameters location of the mass 4

Penktos masės (apsauginio vožtuvo):

$$m_5 \ddot{q}_5 = p_{10} S_{51} - p_9 S_{52} - k_4 (q_{50} + q_5) - F_{tr50} \operatorname{sgn}(\dot{q}_5), \quad (2.35)$$

$$\text{čia: } S_{51}(q_5) = \begin{cases} \frac{\pi d_{53}^2}{4}, & \text{kai } q_5 = 0, \\ \frac{\pi d_{51}^2}{4}, & \text{kai } q_5 > 0, \end{cases}; \quad k_4 - m_5 \text{ masę veikiančios spyruoklės standu-}$$

mo koeficientas; q_{50} – penktą masę veikiančios spyruoklės įvarža; F_{tr50} – trinties jėga tarp penktos masės kūno ir greitaveikio vožtuvo korpuso.



2.14 pav. Penktos masės skersmenų išdėstymas

Fig. 2.14. Diameters location of the mass 5

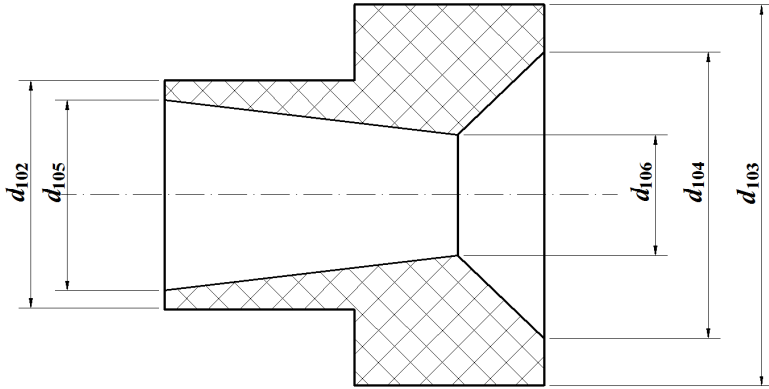
Šeštos masės (greitaveikis vožtuvas):

$$m_6 \ddot{q}_6 = p_8 S_{81} - p_9 S_{82} - F_{tr60} \operatorname{sgn}(\dot{q}_6), \quad (2.36)$$

$$\text{čia: } S_{81} = \begin{cases} \frac{\pi (d_{103}^2 - d_{102}^2)}{4}, \\ S_{81} = 0, & \text{kai } q_6 = L_6, \end{cases}$$

$$S_{82} = \frac{\pi (d_{103}^2 - d_{104}^2)}{4}, \quad \text{kai } q_6 < L_6; \quad L_6 - \text{šeštos masės judesio eigos dydis,}$$

F_{tr60} – trinties jėga tarp šeštos masės kūno (greitaveikio vožtuvo) ir korpuso.



2.15 pav. Šeštos masės skersmenų išdėstymas

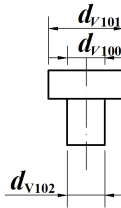
Fig. 2.15. Diameters location of the mass 6

Septintos masės:

$$m_7 \ddot{q}_7 = p_{10} S_7 - k_5 (q_{70} + q_7) - p_{\infty} S_{71} - F_{lr70} \operatorname{sgn}(\dot{q}_7), \quad (2.37)$$

$$\text{čia: } S_7 = \begin{cases} \frac{\pi d_{V100}^2}{4}, & \text{kai } q_7 = 0, \\ \frac{\pi d_{V101}^2}{4}, & \text{kai } q_7 > 0, \end{cases} \quad S_{71} = \frac{\pi (d_{V101}^2 - d_{V102}^2)}{4}; \quad k_5 - m_7 \text{ masė veikiančios}$$

spyruoklės standumo koeficientas; q_{70} – septintą masę veikiančios spyruoklės įvarža; F_{lr70} – trinties jėga tarp septintos masės kūno ir korpuso.



2.16 pav. Septintos masės skersmenų išdėstymas

Fig. 2.16. Diameters location of the mass 7

Slėgio kitimo darbinėse ertmėse lygtys:

lygtyse G_{ic} – tekančio oro masės iš i tūrio į c tūrį,

S_{ic} – skerspjūvio plotas kanaluose ir ertmėse tarp i ir c tūrių,

μ_{ic} – kanalo ar ertmės tarp i ir c tūrių koeficientas.

Pirmame tūryje:

$$\dot{p}_1 = \frac{\gamma RT}{V_1} (G_{91} - G_{12} - G_{17}) - \frac{\mathcal{P}_1}{V_1} \dot{V}_1, \quad (2.38)$$

$$\text{čia: } G_{91} = \mu_{19} S_{19} p_9 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_1}{p_9} \right);$$

$$G_{12} = \mu_{12} S_{12} p_1 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_2}{p_1} \right); \quad G_{17} = \begin{cases} \mu_{17} S_{71} p_1 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_7}{p_1} \right), & \text{kai } p_1 \geq p_7, \\ \mu_{17} S_{71} p_7 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_1}{p_7} \right), & \text{kai } p_7 > p_1. \end{cases}$$

Antrame tūryje:

$$\dot{p}_2 = \frac{\gamma RT}{V_2} (G_{12} - nz_1 G_{23} - nz_2 G_{24} - G_{25}) - \frac{\mathcal{P}_2}{V_2} \dot{V}_2, \quad (2.39)$$

čia nz_1, nz_2 – 2.11 pav. parodytų kiaurymių skaičius;

$$G_{23} = \begin{cases} \mu_{23} S_{14} p_2 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_3}{p_2} \right), & \text{kai } p_2 \geq p_3, \\ \mu_{23} S_{14} p_3 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_2}{p_3} \right), & \text{kai } p_3 > p_2, \end{cases}$$

S_{14} – kanalo nz_1 skerspjūvio plotas;

$$G_{24} = \begin{cases} \mu_{24} S_{34} p_2 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_4}{p_2} \right), & \text{kai } p_2 \geq p_4, \\ \mu_{24} S_{34} p_4 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_2}{p_4} \right), & \text{kai } p_4 > p_2, \end{cases}$$

$$G_{25} = \begin{cases} \mu_{25} S_{25} p_2 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_5}{p_2} \right), & \text{kai } p_2 \geq p_5, \\ \mu_{25} S_{25} p_5 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_2}{p_5} \right), & \text{kai } p_5 > p_2. \end{cases}$$

Trečiame tūryje:

$$\dot{p}_3 = \frac{\gamma RT}{V_3} (nz_1 G_{23}) - \frac{\mathcal{P}_2}{V_3} \dot{V}_3. \quad (2.40)$$

Ketvirtame tūryje:

$$\dot{p}_4 = \frac{\gamma RT}{V_4} (G_{24} - G_{45}) - \frac{\mathcal{P}_4}{V_4} \dot{V}_4, \quad (2.41)$$

$$\text{čia } G_{45} = \begin{cases} \mu_{45} S_{25} p_4 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_5}{p_4} \right), & \text{kai } p_4 \geq p_5, \\ \mu_{45} S_{25} p_5 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_4}{p_5} \right), & \text{kai } p_5 > p_4. \end{cases}$$

Penktame tūryje:

$$\dot{p}_5 = \frac{\gamma RT}{V_5} (G_{45} - nz_3 G_{56}) - \frac{\mathcal{P}_5}{V_5} \dot{V}_5, \quad (2.42)$$

čia nz_3 – 2.10 pav. parodytų kiaurymių skaičius,

$$G_{56} = \begin{cases} \mu_{56} S_{56} p_5 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_6}{p_5} \right), & \text{kai } p_5 \geq p_6, \\ \mu_{56} S_{56} p_6 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_5}{p_6} \right), & \text{kai } p_6 > p_5. \end{cases}$$

Šeštame tūryje:

$$\dot{p}_6 = \frac{\gamma RT}{V_6} (nz_3 G_{56} - G_{60}) - \frac{\mathcal{P}_5}{V_5} \dot{V}_5, \quad (2.43)$$

$$\text{čia } G_{60} = \begin{cases} \mu_6 S_6 p_6 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_\infty}{p_6} \right), & \text{kai } p_6 \geq p_\infty, \\ \mu_6 S_6 p_6 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_6}{p_\infty} \right), & \text{kai } p_\infty > p_6. \end{cases}$$

Septintame tūryje:

$$\dot{p}_7 = \frac{\gamma RT}{V_7} (G_{17} - G_{70}) - \frac{\mathcal{P}_7}{V_7} \dot{V}_7, \quad (2.44)$$

$$\text{čia } G_{70} = \begin{cases} \mu_{70} S_{70} p_7 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_\infty}{p_7} \right), & \text{kai } p_7 \geq p_\infty, \\ \mu_{70} S_{70} p_7 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_7}{p_\infty} \right), & \text{kai } p_\infty > p_7. \end{cases}$$

Aštuntame tūryje:

$$\dot{p}_8 = \frac{\gamma RT}{V_8} (G_{108} - G_{80}) - \frac{\mathcal{P}_8}{V_8} \dot{V}_8, \quad (2.45)$$

$$\text{čia } G_{108} = \begin{cases} \mu_{108} S_{108} p_{10} K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_8}{p_{10}} \right), & \text{kai } p_{10} \geq p_8, \\ \mu_{108} S_{108} p_8 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_{10}}{p_8} \right), & \text{kai } p_8 > p_{10}, \end{cases}$$

$$G_{80} = \begin{cases} \mu_8 S_{820} p_8 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_\infty}{p_8} \right), & \text{kai } p_8 \geq p_\infty, \\ \mu_8 S_{820} p_\infty K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_8}{p_\infty} \right), & \text{kai } p_\infty > p_8. \end{cases}$$

Devintame tūryje:

$$\dot{p}_9 = \frac{\gamma RT}{V_9} (G_{109} - G_{911} - G_{91}), \quad (2.46)$$

$$\text{čia } G_{109} = \begin{cases} \mu_{109} S_{109} p_{10} K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_9}{p_{10}} \right), & \text{kai } p_{10} \geq p_9, \\ \mu_{109} S_{109} p_9 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_{10}}{p_9} \right), & \text{kai } p_9 > p_{10}. \end{cases}$$

Dešimtame tūryje:

$$\dot{p}_{10} = \frac{\gamma RT}{V_{10}} (G_{1210} - G_{108} - G_{109} - G_{100}), \quad (2.47)$$

$$\text{čia } G_{1210} = \begin{cases} \mu_0 S_0 p_0 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_{10}}{p_0} \right), & \text{kai } p_0 \geq p_{10}, \\ \mu_0 S_0 p_{10} K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_0}{p_{10}} \right), & \text{kai } p_{10} > p_0, \end{cases}$$

$$G_{100} = \begin{cases} \mu_{100} S_7 p_{10} K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_\infty}{p_{10}} \right), & \text{kai } p_{10} \geq p_\infty, \\ \mu_{100} S_7 p_\infty K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_{10}}{p_\infty} \right), & \text{kai } p_\infty > p_{10}. \end{cases}$$

Vienuoliktame tūryje:

$$\dot{p}_{11} = \frac{\gamma RT}{V_{11}} (G_{911} - G_{110}), \quad (2.48)$$

$$\text{čia } G_{911} = \begin{cases} \mu_{911} S_{911} p_9 K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_{11}}{p_9} \right), & \text{kai } p_9 \geq p_{11}, \\ \mu_{911} S_{911} p_{11} K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_9}{p_{11}} \right), & \text{kai } p_{11} > p_9, \end{cases}$$

$$G_{110} = \begin{cases} \mu_{110} S_{110} p_{11} K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_\infty}{p_{11}} \right), & \text{kai } p_{11} \geq p_\infty, \\ \mu_{110} S_{110} p_\infty K_1 \varphi \left(\sigma = \frac{p_{11}}{p_\infty} \right), & \text{kai } p_\infty > p_{11}. \end{cases}$$

Dvyliktame tūryje:

$$\dot{p}_{12} = \frac{\gamma RT}{V_{12}}(-G_{1210}), \quad (2.49)$$

$$\text{čia } G_{1210} = \begin{cases} \mu_{1210} S_{1210} p_{10} K_1 \varphi\left(\sigma = \frac{p_{\infty}}{p_{10}}\right), & \text{kai } p_{10} \geq p_{\infty}, \\ \mu_{1210} S_{1210} p_{\infty} K_1 \varphi\left(\sigma = \frac{p_{10}}{p_{\infty}}\right), & \text{kai } p_{\infty} > p_{10}. \end{cases}$$

Pateiktos lygtys sudaro galimybes modeliuoti vykstančius procesus automatiškai IHPGI, atlikti reikiamų charakteristikų parinkimą.

2.4. Įrenginio ir naudotojo, kaip biomechaninės sistemos, sąveikos matematinis modelis

Veikiant IHPGI, kuriose naudojama suslėgtojo oro energija vandeniui išmesti, atsiranda nemažų atatrankų. IHPGI veikimas tam tikra prasme prilyginamas šaunamojo ginklo veikimui. Šaunamojo ginklo besiplečiančių parako dujų vaidmenį atlieka besiplečiantis suslėgtasis oras, o kulkos – vandens porcija išmetamo impulsinio „šūvio“ metu. Įvertinus tai, kad išmetama vandens masė gerokai didesnė nei kulkos, galimas didelis atatrankos poveikis IHPGI naudotojui.

Atatranka – tai įrenginio judėjimas atgal impulsinio „šūvio“ metu. Impulso metu atsiranda garsas, įrenginys pajuda atgal ir naudotojas patiria smūgį. Atatrankos jėgos smūgio dydis daugiausia priklauso nuo fizinių naudotojo parametrų, kuriuos lemia skeleto ir raumenų struktūra, ir nuo įrenginio laikymo rankose sąlygų.

Akivaizdu, kad įrenginio svoris ir išmetamo vandens kiekis yra svarbus veiksnys, lemiantis smūgio dydį. Atatranka taip pat labai priklauso nuo išmetamo vandens greičio.

Pagrindiniai atatrankos skaičiavimo principai remiasi trečiuoju Niutono ir impulsų tvermės dėsniais. Materialaus taško judėjimo kiekio pokytis apskaičiuojamas taip (Савельев 1977):

$$mv - mv_0 = \int_{t_0}^t \dot{P} dt, \quad (2.50)$$

čia: m – masė; v_0 – materialaus taško greitis pradiniu momentu t_0 ; v – šio taško greitis momentu t ; $\int_{t_0}^t \dot{P} dt = I$ – jėgos impulso integralas; mv – materialaus taško judėjimo kiekis.

HPGĮ atatrąkos atsiradimą nulemia tokie veiksniai:

– reakcija lydimą vandens porcijos greitėjimo iš ramybės būsenos iki jo išmetimo iš įrenginio greičio;

– reakcija lydimą ištekantį iš įrenginio suslėgtojo oro, kai vandens porcija palieka vamzdį.

Pirminė atatrąkos dalis, remiantis impulso tvermės dėsniu, skaičiuojama taip:

$$-m_I v_I + m_v v_v = 0, \quad (2.51)$$

čia: m_I , m_v – IHPGĮ ir išmetamo vandens masės; v_I , v_v – IHPGĮ ir vandens greičiai.

Tuomet IHPGĮ greitis lygus:

$$v_I = v_v \frac{m_v}{m_I}. \quad (2.52)$$

Vandens kiekis iki visiško jo išmetimo iš IHPGĮ laikomas vientisa mase. Vandens masės kinetinė energija skaičiuojama taip:

$$E_v = \frac{1}{2} m_v v_v^2. \quad (2.53)$$

IHPGĮ kinetinė energija atitinkamai:

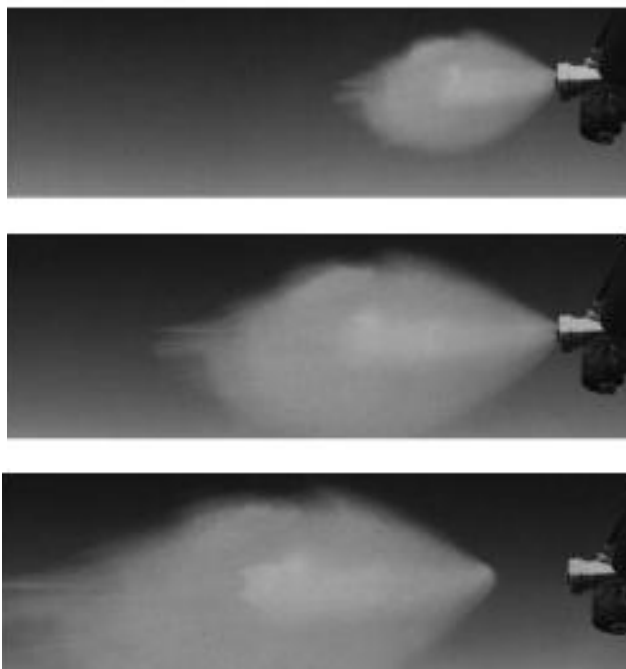
$$E_I = \frac{1}{2} m_I v_I^2. \quad (2.54)$$

Antroji atatrąkos dalis atsiranda, kai vandens masė palieka IHPGĮ vamzdį ir suslėgtasis oras gali laisvai plėstis atmosferoje. Vandens išmetimas iš IHPGĮ parodytas 2.17 paveiksle.

Tuo metu IHPGĮ veikianti jėgos dedamosi, pagal šaunamųjų ginklų analogiją (Bercovitz 2007; Hatcher 1957) atsirandanti dėl ištekantį dujų plėtimosi, gali būti surandama taip:

$$F_r = Q_m v_d + (p_{iš} + p_0) A, \quad (2.55)$$

čia: F_r – reaktyvinė dujų srauto jėga Q_m ; Q_m – dujų masės debitas; v_d – ištekantių dujų greitis; $p_{iš}$, p_0 – ištekantių dujų ir atmosferos slėgis; A – IHPGĮ vamzdžio vidinio skerspjūvio plotas.



2.17 pav. Vandens masės išmetimas iš IHPGĮ
Fig. 2.17. Mass of water discharge from the IHPED

Įvertinus vandens judėjimo pagreitį vamzdyje galima nustatyti suslėgtojo oro sugeneruotą jėgą:

$$F_d = \frac{m_v v_v^2}{2l}, \quad (2.56)$$

čia: F_d – suslėgtojo oro sugeneruota jėga; l – IHPGĮ vandens vamzdžio ilgis.

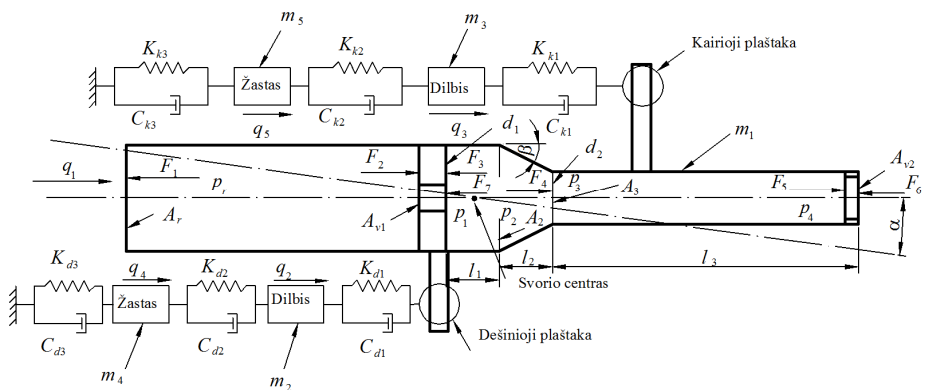
IHPGĮ atatranksos matematinio modelio sudarymas

IHPGĮ judėjimas „šūvio“ metu nagrinėjamas įvertinant tampriąsias ir klampiąsias žmogaus kūno savybes. IHPGĮ pozicija ir laikymo ypatybės prieš naudojimą parodytos 2.18 paveiksle.



2.18 pav. IHPGĮ laikymo vaizdas prieš naudojimą
Fig. 2.18. A view of holding the IHPED before the use

Ugniagesys gelbetojas prieš „šūvį“, siekdamas atsverti atatrąkos jėgas, turi palenkti savo kūną šiek tiek į priekį (IFEX 3012 2001; Bogdevičius, Suslavičius 2006), įrenginį laikyti rankose ir neatremti į jokiais kūno dalis. Pasinaudojus mokslininko Hillo sukurtais žmogaus elementų dinaminų modelių pagrindais (*Fung* 1993) ir principais, nurodytais žinyne (Астахов *et al.* 1981), sudaromas supaprastintas IHPGI dinaminis atatrąkos modelis, pavaizduotas 2.19 paveiksle.



2.19 pav. IHPGĮ atatranks modelis
Fig. 2.19. The recoil model of the IHPED

Nagrinėjamas IHPGĮ judėjimas. Įrenginio svorio centras – C. Įrenginys laikomas dviem rankomis. Modelyje ugniagesio ir įrenginio sąveika imituojama mechaninėmis jungtimis su klampiojo slopinimo elementais, kurie atitinka dešinės ir kairės pusės plaštakas, dilbius ir žastus. Dešinės rankos imituojamų mechaninių spyruoklių koeficientai K_{d1} , K_{d2} , K_{d3} ir klampiojo pasipriešinimo koeficientai C_{d1} , C_{d2} , C_{d3} . Atitinkamai kairės rankos – K_{k1} , K_{k2} , K_{k3} ir C_{k1} , C_{k2} , C_{k3} . Teigiama, kad dešinės ir kairės rankų atitinkamų elementų koeficientai yra vienodi. Taip pat teigiama, kad teisingai laikant įrenginį visos jėgos F ir rankų pasipriešinimas veikia IHPGĮ išilginės ašies kryptimi net ir jam pasvyrant horizonto atžvilgiu kampui α . Atitinkamose IHPGĮ vietose susidaro slėgiai p_i , kurie veikia plotus A_i . Veikiančios jėgos priverčia įrenginį atlikti poslinkį q_1 ir atitinkamų rankų dalių poslinkius q_{2-5} . Kiti reikalingi geometriniai IHPGĮ duomenys parodyti 2.19 pav.

Parašomos IHPGĮ ir rankų dalių judėjimo tokios diferencialinės lygtys:

$$m_1(t)\ddot{q}_1 = \sum F(t) - \dot{m}_1\dot{q}_1 - m_1(t)g \sin \alpha - K_{d1}(q_1 - q_2) - C_{d1}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) - K_{k1}(q_1 - q_3) - C_{k1}(\dot{q}_1 - \dot{q}_3), \quad (2.57)$$

$$\text{čia: } \sum F(t) = -F_1 + F_2 - F_3 + F_4 + F_5 - F_6 + F_{tr1} + F_{tr2} + F_{tr3} - F_7,$$

$$F_1 = p_r A_r, \quad F_2 = p_r(A_r - A_{v1}), \quad F_3 = p_1(A_r - A_{v1}),$$

$$F_4 = \sum_{i=k2}^{np2} S_{i,i+1} \frac{1}{2} (p_i + p_{i+1}) \sin \beta,$$

$$S_{i,i+1} = 2\pi\sqrt{1+b^2} (x_{i+1} - x_i) \left[\frac{d_2}{2} - bl_1 + \frac{b}{2}(x_{i+1} + x_i) \right],$$

$S_{1,i,i+1}$ $S_{1,i,i+1} - l_1$ ilgio dalyje tarp tinklo mazgų i , $i+1$, $i, i+1$ sienelių plotas yra lygus, $S_{1,i,i+1} = \pi d_1 (x_{i+1} - x_i)$; k_2 ir np_2 – tinklo mazgų numeriai, tarp kurių yra vandens; $b = \frac{d_2 - d_1}{2l_2}$; $F_5 = p_4(A_3 - A_{v2})$, $F_6 = \frac{1}{2} \rho A_{v2} v^2$;

trinties jėga, veikianti l_1 dalyje panaudojus Darsi-Weisbacho formulę,

$$F_{tr1} = \sum_{i=k_1}^{np_1} \tau_{i,i+1} S_{1,i,i+1} = \sum_{i=k_1}^{np_1} \frac{1}{8} \rho \lambda \left[\frac{(Re_i + Re_{i+1})}{2} \right] \frac{(v_i + v_{i+1})^2}{4} S_{1,i,i+1},$$

$\tau_{i,i+1}$ – tangentiniai įtempiai, veikiantys l_1 ilgio dalyje, tarp tinklo mazgų

$i, i+1$ ir $i+1$; k_1 ir np_1 tinklo mazgų numeriai tarp kurių yra vandens; trinties jėga, veikianti l_2 dalyje,

$$F_{tr2} = \sum_{i=k_2}^{np_2} \tau_{i,i+1} S_{2,i,i+2} \cos \beta = \sum_{i=k_2}^{np_2} \frac{1}{8} \rho \lambda \left[\frac{(\text{Re}_i + \text{Re}_{i+1})}{2} \right] \frac{(v_i + v_{i+1})^2}{4} S_{2,i,i+1} \cos \beta,$$

$$S_{2,i,i+1} = 2\pi \sqrt{1+b^2} (x_{i+1} - x_i) \left[\frac{d_1}{2} - \frac{b}{l_1} + \frac{b}{2} (x_{i+1} + x_i) \right],$$

x_i – koordinačių taškai IHPGĮ išilgine kryptimi; trinties jėga, veikianti l_3 ilgio dalyje,

$$F_{tr3} = \sum_{i=k_3}^{np_3} \tau_{i,i+1} S_{3,i,i+1} = \sum_{i=k_3}^{np_3} \frac{1}{8} \rho \lambda \left(\frac{(\text{Re}_i + \text{Re}_{i+1})}{2} \right) \frac{(v_i + v_{i+1})^2}{4} S_{3,i,i+1},$$

$$S_{3,i,i+1} = \pi d_2 (x_{i+1} - x_i),$$

v^2 – išmetamo vandens greitis;

$$F_7 = \frac{1}{2} \rho A_{v1} (t) v_{12}^2,$$

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad v_{12} = \frac{Q_{12}}{A_{v1}} = \frac{1}{A_{v1}} \left(\frac{G_{12}}{\rho} \right), \quad G_{12} = \mu A_{v1} p_r K_1(t) \varphi \left(\sigma = \frac{p_1}{p_r} \right),$$

$$m_1(t) = m_{10} + m_v(t),$$

$m_1(t)$ – bendroji įrenginio masė; m_{10} – įrenginio masė kartu su plaštakų svorio įvertinimu; $m_v(t)$ – ištekančio vandens masė;

$$m_v(t) = \rho V_{d1}(t) + \rho V_{d2}(t) + \rho V_{d3}(t),$$

V_{d1}, V_{d2}, V_{d3} – vandens užimami tūriai atitinkamai l_1, l_2 ir l_3 ilgiuose;

$$V_{d1}(t) = \begin{cases} \frac{\pi d_1^2}{4} (l_1 - x_G), & \text{kai } x_G \leq l_1, \\ 0, & \text{kai } x_G > l_1, \end{cases}$$

$$V_{d2}(t) = \begin{cases} \frac{1}{12} \pi (l_1 + l_2 - x_G) (D^2 + D d_2 + d_2^2), & \text{kai } l_1 \leq x_G \leq l_1 + l_2, \\ 0, & \text{kai } x_G > l_2 + l_1, \end{cases}$$

$$D(x_G) = d_1 - 2(x_G - l_1) \left(\frac{d_1 - d_2}{2l_2} \right),$$

$$V_{d3}(t) = \begin{cases} \frac{\pi d_2^2}{4} (l_3 - x_G), & \text{kai } l_1 + l_2 \leq x_G \leq l_3 + l_2 + l_1, \\ 0, & \text{kai } x_G > l_3 + l_2 + l_1, \end{cases}$$

x_G – vandens ribos G koordinatės,

$$\dot{m}_1(t) = \rho \dot{V}_{d1}(t) + \rho \dot{V}_{d2}(t) + \rho \dot{V}_{d3}(t),$$

$$\dot{V}_{d1} = \begin{cases} -\frac{\pi d_1^2}{4} \dot{x}_G, & \text{kai } x_G \leq l_1, \\ 0, & \text{kai } x_G > l_1, \end{cases}$$

$$\dot{V}_{d2} = \begin{cases} \frac{\pi}{6} (l_1 + l_2 - x_G) (2D + d_2) \dot{D} - \frac{\pi}{12} x_G (D^2 + Dd_2 + d_2^2), & \text{kai } l_1 \leq x_G \leq l_1 + l_2, \\ 0, & \text{kai } x_G > l_1 + l_2, \end{cases}$$

$$\dot{V}_{d3} = \begin{cases} -\frac{\pi}{4} d_2^2 \dot{x}_G, & \text{kai } l_1 + l_2 \leq x_G \leq l_1 + l_2 + l_3, \\ 0, & \text{kai } x_G > l_1 + l_2 + l_3. \end{cases}$$

Atitinkamai dilbių ir žastų judėjimo lygtys, įvertinant IHPGĮ atatrunkos slopinimus, yra tokios:

$$m_2 \ddot{q}_2 = -K_{d1}(q_2 - q_1) - C_{d1}(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) - K_{d2}(q_2 - q_4) - C_{d2}(\dot{q}_2 - \dot{q}_4) + m_2 g \sin \alpha, \quad (2.58)$$

$$m_3 \ddot{q}_3 = -K_{k1}(q_3 - q_1) - C_{k1}(\dot{q}_3 - \dot{q}_1) - K_{k2}(q_3 - q_5) - C_{k2}(\dot{q}_3 - \dot{q}_5) + m_3 g \sin \alpha, \quad (2.59)$$

$$m_4 \ddot{q}_4 = -K_{d2}(q_4 - q_2) - C_{d2}(\dot{q}_4 - \dot{q}_2) - K_{d3}q_4 - C_{d3}\dot{q}_4 + m_4 g \sin \alpha, \quad (2.60)$$

$$m_5 \ddot{q}_5 = -K_{k2}(q_5 - q_3) - C_{k2}(\dot{q}_5 - \dot{q}_3) - K_{k3}q_5 - C_{k3}\dot{q}_5 + m_5 g \sin \alpha. \quad (2.61)$$

Lygtis (2.57)–(2.61), sudarančias bendrąją sistemą, galima užrašyti matricine forma:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F(t, p, v)\}, \quad (2.62)$$

čia: $[M]$ – masių matrica; $[C]$ – slopinimo matrica; $[K]$ – standumo matrica;

$[M] = \text{diag}(m_1, m_2, m_3, m_4, m_5)$ – diagonalioji masių matrica,

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{k1} & 0 & -C_{k1} & 0 & 0 \\ 0 & C_{d2} & 0 & -C_{d2} & 0 \\ -C_{k1} & 0 & C_{k1} & 0 & -C_{k2} \\ 0 & -C_{d2} & 0 & C_{d2} + C_{d3} & 0 \\ 0 & 0 & -C_{k2} & 0 & C_{k3} + C_{k2} \end{bmatrix},$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{k1} & 0 & -K_{k1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{k2} & 0 & -K_{d2} & 0 \\ -K_{k1} & 0 & K_{k1} & 0 & -K_{k2} \\ 0 & -K_{d2} & 0 & K_{d2} + K_{d3} & 0 \\ 0 & 0 & -K_{k2} & 0 & K_{k2} + K_{k3} \end{bmatrix},$$

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} \sum F(t) - \dot{m}_1(t)\dot{q}_1 - m_1(t)g \sin \alpha \\ m_2 g \sin \alpha \\ m_3 g \sin \alpha \\ m_4 g \sin \alpha \\ m_5 g \sin \alpha \end{Bmatrix}.$$

Diferencialinių lygčių sistema integruojama kartu su skysčio ir dujų judėjimo lygtimis.

Transportuojant gesinimo skystį pro IHPGĮ ima sklisti sužadintos bangos, kurios sukelia sistemoje virpesius. Toliau tiriami naudotojo, kaip biomechaninės sistemos, ir IHPGĮ savieji dažniai, pagal kuriuos galima spręsti apie daromą poveikį.

Skaičiuojant naudojamas naujas vektorius:

$$\{\underline{r}\} = \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix}. \quad (2.63)$$

Lygčių sistema (2.62) užrašoma kaip pirmosios eilės diferencialinių lygčių sistema, kurioje bendras lygčių skaičius bus lygus 10:

$$\begin{Bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [0] & [E] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [M]^{-1}\{F(t)\} \end{Bmatrix} \quad (2.64)$$

arba

$$\{\dot{\underline{r}}\} - [A]\{\underline{r}\} = \{B(t)\}, \quad (2.65)$$

čia: $[A] = \begin{bmatrix} [0] & [E] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix},$

$$\{B(t)\} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [M]^{-1}\{F(t)\} \end{Bmatrix}. \quad (2.66)$$

Norint rasti sistemos (2.65) tikrines reikšmes ir vektorius, vektorius $\{F(t)\}$ prilyginamas nuliui, tada gaunama tokia lygčių sistema:

$$\{\dot{\underline{r}}\} = [A]\{\underline{r}\}. \quad (2.67)$$

Lygčių sistemos (2.67) sprendinys turi tokį pavidalą:

$$\{\underline{r}\} = \{r\} e^{\lambda t}, \quad (2.68)$$

čia: λ – tikrinė reikšmė; $\{r\}$ – dešinysis tikrinis vektorius.

Ištačius sprendinį (2.68) į lygčių sistemą (2.67), gaunama:

$$([A] - \lambda[B])\{r\} = \{0\}. \quad (2.69)$$

Išsprendus tikrinių reikšmių uždavinį (2.69), gaunama, kad $2N = 10$ tikrinių reikšmių ir tikrinių vektorių, t. y. $\lambda_j, \{r_j\}, j = 1, 2, \dots, 2N$. Bendruoju atveju tikrinės reikšmės ir tikriniai vektoriai yra kompleksiniai skaičiai:

$$\lambda_j = \alpha_j \pm i\beta_j,$$

$$\{r_j\} = \text{Re}\{r_j\} + i\text{Im}\{r_j\}, \quad (2.70)$$

čia $\text{Re}\{r_j\}, \text{Im}\{r_j\}$ – funkcijos, išskiriančios kompleksinio skaičiaus realiąją ir kintamąją dalis.

Slopinimo dekrementas, atitinkantis j -ąjį savąjį dažnį, yra lygus:

$$D_j = 2\pi \frac{|\alpha_j|}{\beta_j}. \quad (2.71)$$

Pagal sudarytą modelį galima vertinti IHPGĮ darbo metu vykstančių procesų poveikį naudotojui, nustatyti reikalingų tvirtinimų atsparumo charakteristikas, įrenginio IHPGĮ būtų stacionariai tvirtinamas įvairiuose transporto objektuose.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. To paties vandens tūrio šilumos sugėrimo savybių naudojimas priklauso nuo to tūrio susmulkinimo į atskirus lašelius ir šių lašelių judėjimo greičio. Gauta lašelių dydžio ir greičio priklausomybė leidžia nustatyti jų reikšmes, reikalingas nedideliams gaisro židiniams gesinti. Kad lašeliai pasiektų gesinamą paviršių, kai pasiekiamas 120 m/s greitis, jų skersmuo turi būti ne mažesnis kaip 1,8 μm .

2. Sudarytas IHPGĮ hidrodinaminių procesų matematinis modelis leidžia vertinti skysčio ir suslėgtojo oro judėjimus, kuriais remiantis gali būti modeliuojami naujų savybių tokio tipo įrenginiai.

3. Sukurtas automatinio veikimo IHPGĮ principas ir sudarytas jo matematinis modelis leidžia parinkti tokias įrenginio charakteristikas, kurios užtikrintų reikiamo intensyvumo vandens tiekimą.

4. Sudarytas IHPGĮ ir jo naudotojo sąveikos matematinis modelis leidžia vertinti veikiančio įrenginio poveikį naudotojui.

Įrenginio teorinių tyrimų rezultatų analizė

Šiame skyriuje pateikiama IHPGĮ ir automatinio IHPGĮ dinaminių bei hidrodinaminių procesų teorinių rezultatų analizė, patikrinamas teorinių matematinių modelių tikslumas. Parodoma naudotojo, kaip biomechaninės sistemos, sąveikos teorinių rezultatų analizė, pateikiamos teorinių tyrimų skaitinės reikšmės. Skyriaus tematika paskelbti trys autoriaus straipsniai (Aladjev, Bogdevičius, Suslavičius 2005; Bogdevičius, Suslavičius 2005; Bogdevičius, Suslavičius 2006).

3.1. Įrenginio hidrodinaminių procesų analizė

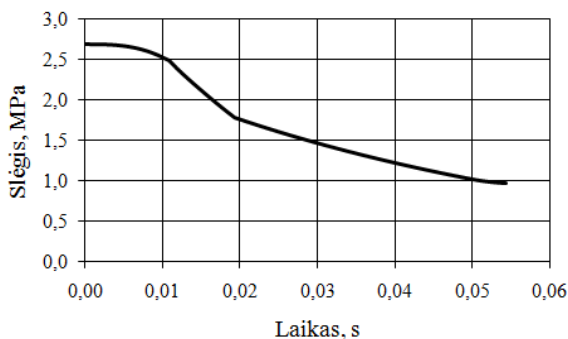
Skaitiniams rezultatams gauti naudojami esamų IHPGĮ ir eksperimentinių vandens kamerų (vamzdžių) parametrai:

- suslėgtojo oro kameros tūris $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$,
 - pradinis slėgis suslėgtojo oro kameroje 2,7 MPa,
 - esamos vandens kameros ilgis 0,410 m, skersmuo 0,06 m;
- eksperimentinių vandens kamerų duomenys:
- 20T – ilgis 0,4 m ir skersmuo 0,02 m,

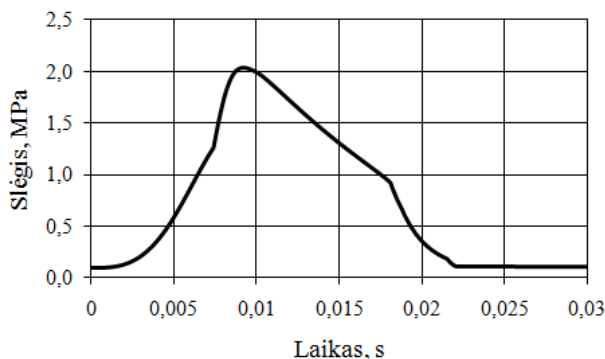
- 25T – ilgis 0,4 m ir skersmuo 0,025 m,
- 25I – ilgis 0,5 m ir skersmuo 0,025 m,
- 35T – ilgis 0,4 m ir skersmuo 0,035 m,
- 35I – ilgis 0,5 m ir skersmuo 0,035 m.

Pagal IHPGĮ matematinio modelio sudarytas lygtis, naudojant kompiuterinę programinę įrangą *Compaq Visual Fortran Professional v 6.3* ir *Maple 9.01*, vykstančių procesų esamų IHPGĮ ir eksperimentinėse vandens kamerosse skaičiavimus. Pasirenkami laiko intervalai kas $1,0 \cdot 10^{-6}$ s. Vandens kameros ilgiai L dalijami kas 2 mm (Aladjev, Bogdevičius, Suslavičius 2005; Bogdevičius, Suslavičius 2005).

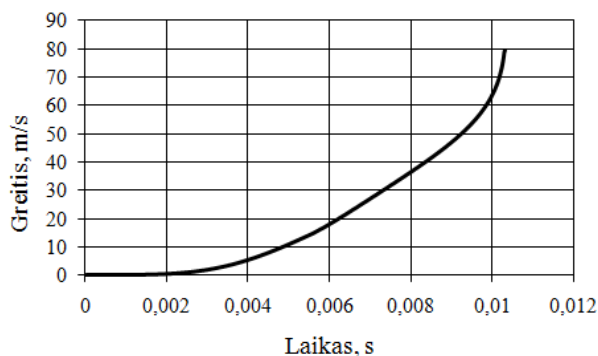
Hidrodinaminių procesų esamo IHPGĮ rezultatai pateikti 3.1–3.3 paveiksluose.



3.1 pav. Oro slėgio kitimas pirmoje oro kameroje
Fig. 3.1. Changes of the air pressure in the first volume



3.2 pav. Oro slėgio kitimas esamo IHPGĮ antrame oro tūryje
Fig. 3.2. Changes of the air pressure in the second volume of the available IHPED

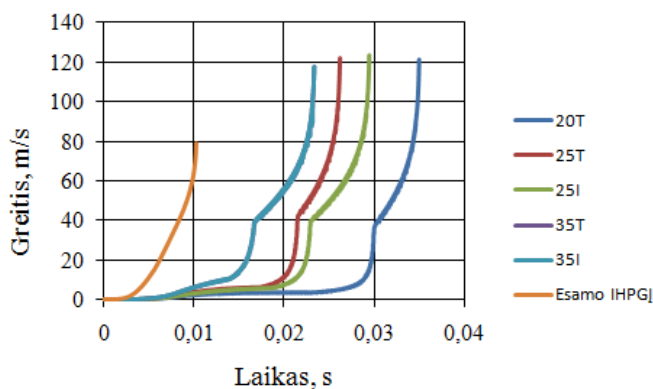


3.3 pav. Skysčio greičio kitimas vandens kameros gale

Fig. 3.3. The velocity of the liquid at the end of the water camera

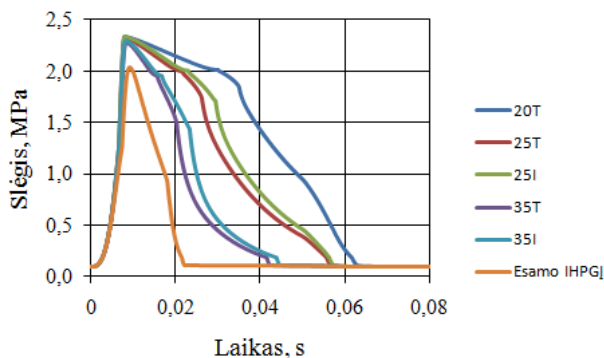
Gauti skaitiniai rezultatai patvirtina kitų mokslininkų atliktų tyrimų metu gautus esamų IHPGĮ pagrindinius parametrus, naudojant *Oxford Lazer Imaging* sistemas (Hewitt, O'Donnell, Dorr, Woods 2006). Vandens srautas išstumiamas iš vamzdžio iki 80 m/s greičiu ir gaunami susmulkinto vandens lašai nuo 30 iki 430 μm skersmens.

Hidrodinaminių procesų, naudojant eksperimentines vandens kameras, rezultatai pateikti 3.4–3.5 paveiksluose.



3.4 pav. Skysčio greičių kitimo palyginimo grafikai

Fig. 3.4. The chart demonstrating varying fluid velocity



3.5 pav. Oro slėgio kitimo, naudojant skirtingas vandens kameras, lyginimas
Fig. 3.5. Air pressure variation depending on the type of the water chamber

Gauti skaitiniai rezultatai rodo išmetamo vandens greičio kitimus priklausomai nuo vandens kamerų parametrų: esamo IHPGI – 78,8 m/s, 20T – 122 m/s, 25T – 122 m/s, 25I – 123 m/s, 35T – 117 m/s, 35I – 118 m/s. Duomenys rodo, kad didėjant vandens kamerų skersmenims trumpėja išpurškimo laikas, bet mažėja vandens srauto greitis. Remiantis sudarytu matematiniu modeliu galima parinkti skirtingų parametrų kameras, kurios užtikrintų vandens išmetimą reikiama greičiais. Slėgio kitimai rodo, kad maksimalus slėgis vandens kameroje atsidarant greitaveikiam vožtuvui esamo IHPGI pasiekiamas per 9 ms, o eksperimentinių – per 8 ms. Šis skirtumas yra nedidelis. Slėgio kritimai iki atmosferinio lygio yra greitesni didesnio skersmens ir trumpesniuose vamzdžiuose ir atitinkamai sudarė: esamo IHPGI – 21 ms, 35T – 39 ms, 35I – 42 ms, 25T – 54 ms, 25I – 55 ms, 20T – 61 ms.

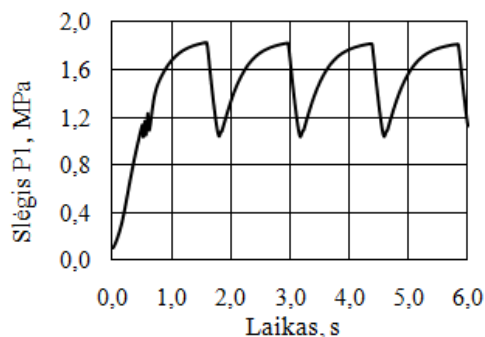
3.2. Automatinio įrenginio dinaminių ir hidrodinaminių procesų teorinių rezultatų analizė

Skaitiniams rezultatams gauti naudojami automatinio IHPGI parametrai:

- vandens kameros ilgis 0,40 m,
- suslėgtojo oro kameros tūris $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$,
- pradinis slėgis suslėgtojo oro kameroje 2,7 MPa,
- vandens kameros skersmuo 0,035 m.

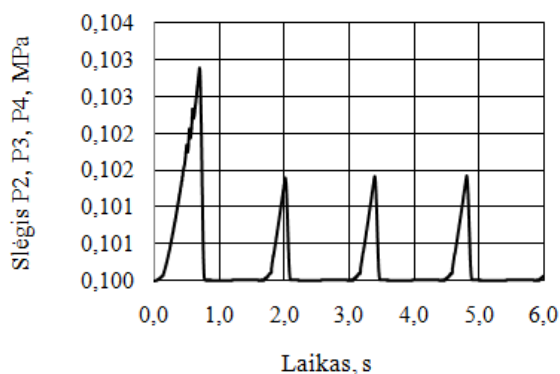
Pasirenkami laiko intervalai kas $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}$. Vandens kameros ilgis padalijamas į 82 dalis.

Automatinio IHPGĮ su greitaveikio vožtuvo valdymo mechanizmu slėgio kitimo rezultatai 1 tūryje, nurodytame 2.9 paveiksle., pateiktas 3.6 paveiksle.



3.6 pav. Slėgio kitimas pirmame tūryje (V1)
Fig. 3.6. Changes of the pressure in the 1 volume (V1)

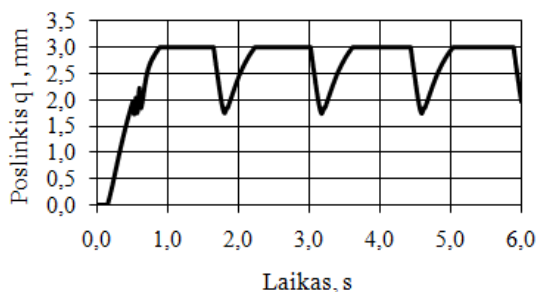
Slėgio kitimai pirmame tūryje rodo nustatytus automatinio reguliavimo režimus. Įrenginio įjungimo metu slėgis pirmame tūryje kyla, kol suveikia reguliuojamas rutulinis vožtuvas 7 (sudėtinių automatinio IHPGĮ dalių numeracija pateikta A priede). Kylant slėgiui pirmo tūrio apimtis didėja, nes stūmoklis 6.1 slenka. Atsidarius vožtuvui 6 slėgis tūryje krinta, tačiau ne iki pradinio lygio, nes suslėgtasis oras tiekiamas nenutrūkstamai. Analogiškai slėgiai kinta septintame, aštuntame, devintame ir dešimtame tūriuose. Slėgio kitimų rezultatai antroje, trečioje ir ketvintoje tūriuose pateikti 3.7 paveiksle.



3.7 pav. Slėgio kitimas antrame, trečioje ir ketvintoje tūriuose (V2, V3, V4)
Fig. 3.7. Changes of the pressure in the 2, 3 and 4 volumes (V2, V3, V4)

Slėgis antrame, trečiame ir ketvirtame tūriuose kinta pagal nustatytus automatinio reguliavimo režimus. Pirmo periodo metu slėgis šiuose tūriuose didesnis nei kitų periodų metu, nes automatinio IHPGĮ pradinio įjungimo metu pirmame tūryje slėgis nuo pradinio iki darbinio kyla ilgesnį laiką.

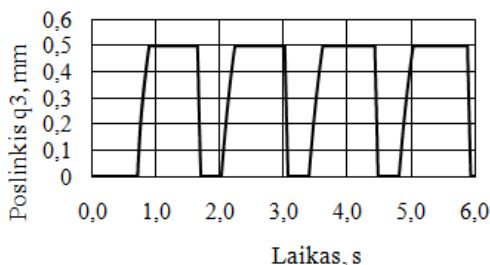
Automatinio IHPGĮ pirmos masės poslinkio įvertinimo rezultatai pateikiami 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Pirmos masės poslinkis
Fig. 3.8. Displacement of the mass 1

Pirmos masės arba 6.1 reguliuojamo vožtuvo stūmoklio, nurodyto A priede, poslinkiai rodo nustatytus automatinio reguliavimo režimus ir priklauso nuo slėgių kitimų tūriuose. Automatinio IHPGĮ įjungimo metu pirmo periodo poslinkio laikas yra ilgesnis, nes slėgis nuo pradinio iki darbinio pirmame tūryje kyla ilgiau. Darbo metu pirmą masę iki galo negrįžta į pradinę padėtį, kol nebus išjungtas automatinis IHPGĮ veikimas, nes pirmame tūryje nuolat yra didesnis nei pradinis slėgis. Analogiškai vyksta ir antros masės poslinkiai.

Automatinio IHPGĮ 3 masės poslinkio įvertinimo rezultatai pateikiami 3.9 paveiksle.



3.9 pav. Trečios masės poslinkis
Fig. 3.9. Displacement of the mass 3

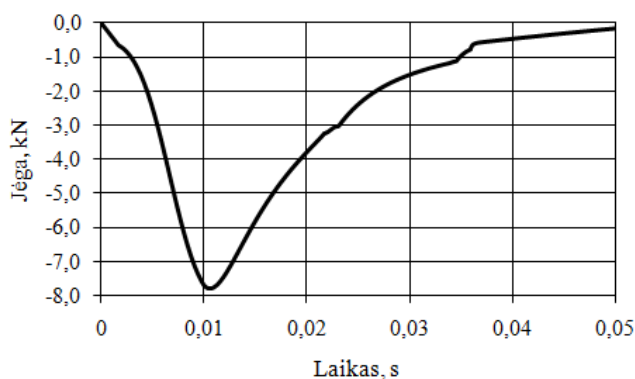
Trečios masės arba 7 reguliuojamo rutulinio vožtuvo, nurodyto A priede, poslinkiai priklauso nuo pirmos masės poslinkio. Kiekvieno periodo metu reguliuojamas rutulinis vožtuvas iki galo grįžta į savo pradinę padėtį. Analogiškai vyksta ir kitų masių poslinkiai. Keičiant rutulinio vožtuvo atidarymo laiką gali būti reguliuojami automatinio IHPGĮ veikimo periodai.

Skaitiniai rezultatai rodo, kad automatinio IHPGĮ vandens išstūmimo dažnis nustatytomis sąlygomis ir esant pasirinktiems parametrams sudaro 0,68 Hz. Naudojant automatinio IHPGĮ dinaminį modelį galima parinkti reikiamų charakteristikų parametrus.

3.3. Įrenginio ir naudotojo, kaip biomechaninės sistemos, sąveikos analizė

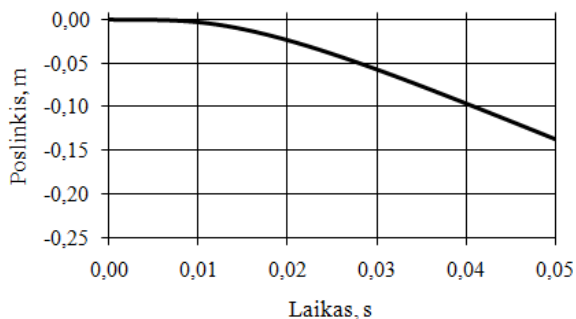
Skaitiniams rezultatams gauti naudojami esamų HPGĮ ir eksperimentinių vandens kamerų parametrai, kurie nurodyti 3.1 poskyrio pradžioje.

Pasirenkami laiko intervalai kas $1,0 \cdot 10^{-6}$ s. Vandens kameros ilgis padalijamas į 82 dalis (Aladjev, Bogdevičius, Suslavičius 2005; Bogdevičius, Suslavičius 2005; Bogdevičius, Suslavičius 2006). Atatrankos modeliavimo procesų rezultatai pateikti 3.10–3.13 pav.



3.10 pav. Atatrankos jėgos priklausomybė nuo laiko esamame IHPGĮ
Fig. 3.10. The Recoil force in dependence of the time of the current IHPED

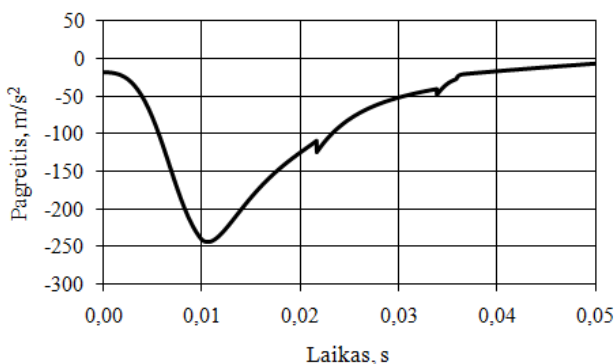
Esamo IHPGĮ atatrankos skaitiniai rezultatai rodo, kad ši jėga siekia 7,76 kN. Tokia jėga IHPGĮ naudotojui, neteisingai laikančiam įrenginį, gali sukelti rimtų traumų.



3.11 pav. Įrenginio poslinkio priklausomybė nuo laiko

Fig. 3.11. The displacement of the device in dependance of the time

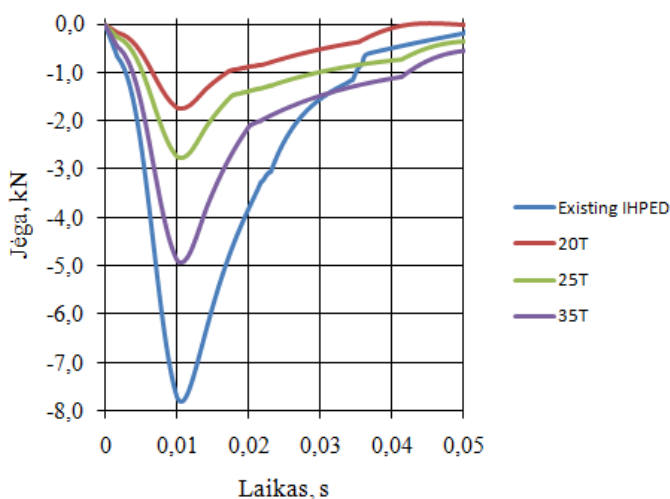
Skaitiniai IHPGĮ poslinkio rezultatai rodo, kad veikiant įrenginiui poslinkis gali siekti iki 15 cm. Tačiau šis poslinkis priklauso nuo įrenginio laikymo būdo. Neteisingai ir per laisvai laikant įrenginį šis poslinkis būtų ne tik didesnis, bet ir sudėtingesnis erdvės atžvilgiu.



3.12 pav. Įrenginio pagreičio priklausomybė nuo laiko

Fig. 3.12. The acceleration of the device in dependance of the time

Skaitiniai IHPGĮ pagreičio rezultatai rodo, kad veikiant įrenginiui pagreitis gali siekti iki 243 m/s^2 . Tačiau, priklausomai nuo įrenginio naudotojo pasipriešinimo, jo fizinių savybių ir laikymo būdo, skaitiniu būdu gautas pagreitis gali labai skirtis.



3.13 pav. Atatrankos jėgų naudojant skirtingus vamzdžius palyginimas
Fig. 3.13. The variation of the recoil forces depending on the pipe used

Atatrankų skaitiniai rezultatai rodo, kad esamos IHPGĮ atatrankos jėga siekia 7,76 kN, su antgaliu 20T – 1,75 kN, su antgaliu 25T – 2,74 kN ir su antgaliu 35T – 4,93 kN. Šie skaičiai rodo, kad su atitinkamais antgaliais galima gauti ne tik didesnius transportuojamo vandens greičius, bet ir mažesnes atatrankos jėgas, kurių reikšmės skitųsi net kartais.

IHPGĮ darbo metu kylančių virpesių vertinimas

IHPGĮ darbo metu yra išpurškiamas vanduo, todėl jo masė kinta. Nustatytime nagrinėjamos biomechaninės sistemos (naudotojas ir IHPGĮ) tikrines reikšmes, savuosius dažnius ir logaritminį dekrementą esant skirtingiems vandens masės kiekiam IHPGĮ. Skaitiniai rezultatai gauti su pasirinkta 35T vandens kamera, esant skirtingiems pasirinktiems vandens kiekiam, kai ji yra pilna vandens, su puse vandens kiekio ir tuščia, t. y. vanduo yra iki galo išpurškštas. Rezultatai pateikiami 3.1–3.3 lentelėse.

3.1 lentelė. Tikrinių reikšmių, savųjų sistemos dažnių ir logaritminio slopinimo dekremento duomenys, kai 35T vandens kamera pilna vandens ($m_v = 0,288$ kg)

Table 3.1. The data of the eigenvalues, own frequencies and logarithmic decrement when 35T nozzle pipe is full of water ($m_v = 0,288$ kg)

Nr.	Tikrinė reikšmė		Savasis dažnis	Slopinimo dekrementas
	α_k	β_k	f, Hz	
1.	-0,051	11,37	1,809	0,028
2.	-0,438	33,57	5,343	0,082
3.	-0,577	38,51	6,130	0,094
4.	-1,222	56,06	8,921	0,137
5.	-1,868	69,29	11,030	0,169

3.2 lentelė. Tikrinių reikšmių, savųjų sistemos dažnių ir logaritminio slopinimo dekremento duomenys, kai 35T vandens kameroje yra pusė vandens kiekio ($m_v = 0,144$ kg)

Table 3.2. The data of the eigenvalues, own frequencies and logarithmic decrement when in the 35T nozzle pipe is half of water ($m_v = 0,144$ kg)

Nr.	Tikrinė reikšmė		Savasis dažnis	Slopinimo dekrementas
	α_k	β_k	f, Hz	
1.	-0,051	11,437	1,820	0,028
2.	-0,438	33,589	5,345	0,082
3.	-0,578	38,552	6,135	0,094
4.	-1,222	56,064	8,922	0,137
5.	-1,869	69,304	11,030	0,160

3.3 lentelė. Tikrinių reikšmių, savųjų sistemos dažnių ir logaritminio slopinimo dekremento duomenys, kai 35T vandens kameroje yra pusė vandens kiekio ($m_v = 0$ kg)

Table 3.3. The data of the eigenvalues, own frequencies and logarithmic decrement when in the 35T nozzle pipe is half of water ($m_v = 0$ kg)

Nr.	Tikrinė reikšmė		Savasis dažnis	Slopinimo dekrementas
	α_k	β_k	f, Hz	
1.	-0,051	11,507	1,831	0,028
2.	-0,439	33,605	5,348	0,082
3.	-0,579	38,588	6,141	0,094
4.	-1,223	56,070	8,923	0,137
5.	-1,869	69,315	11,031	0,169

Gauti skaičiai rodo, kad savieji dažniai, dirbant IHPG, kintant jo masei dėl išpurškiamo vandens, mažai keičiasi ir sudaro nuo 1,809 Hz iki 11,031 Hz. Įvertinant tai, kad naudotojas dirba su IHPG gana trumpai, nuo kelių iki keliolikos minučių per parą poveikis dėl virpesių negali būti didelis. Tačiau atkreiptinas dėmesys į tai, kad sistemos savieji dažniai yra artimi žmogaus saviesiems dažniams ir būtini detalesni atskiri tyrimai, kurie nesprenžiami šiame darbe.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Taikant sukurtą IHPG matematinį modelį ir sudarytas lygtis gauti skaitiniai rezultatai rodo, kad iš esamo IHPG ištekančio vandens greitis siekia 80 m/s ir nesutinka su gamintojų deklaruojamu 120 m/s greičiu. Naudojant kitų parametrų IHPG vandens kameras galima gauti gerokai didesnius nei 80 m/s vandens ištekėjimo greičius, nuo kurių priklauso vandens skaidymas ir jo naudojimo efektyvumas.

2. IHPG darbo metu atsirandančių atatrunkos jėgų teorinis įvertinimas parodė, kad esamo IHPG atatrunkos jėgos sudaro 7,76 kN ir gali kelti pavojų įrenginio naudotojo sveikatai.

3. Sukurtas automatinio IHPG matematinis modelis siūlytinas taikyti projektuojant naujų savybių mobilius IHPG, nes galima modeliuoti įrenginių parametrus, užtikrinančius didesnius vandens išmetimo greičius ir mažesnes jų veikimo metu atsirandančias atatrunkos jėgas.

Eksperimentiniai įrenginio hidrodinaminių bei dinaminių procesų tyrimai

Siekiant nustatyti faktinius IHPGĮ parametrus, priklausomus nuo vamzdžio dydžio, ištirti realiai vykstančių procesų eigą, buvo atlikti tyrimai IHPGĮ eksperimentinių modelių Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento Ugniagesių rengimo mokyklos Valčiūnų pratybų lauke ir Specialiosios priešgaisrinės gelbėjimo valdybos specialiųjų priemonių priežiūros patalpose.

4.1. Naudojama eksperimentinė įranga ir priemonės

Atliekant eksperimentinius tyrimus buvo naudota:

1. „Faser IHPGĮ IPG-1“.
2. Skirtingo skersmens ir ilgio eksperimentiniai vamzdžiai 20T, 25T, 25I, 35T, 35I.
3. Skaitmeninis fotoaparatas „Toshiba PDR-M70“.
4. Slėgio jutikliai „Danfoss MBS 4050“.
5. Analoginis skaitmeninis oscilografas „Hameg HM 1507-3“.

6. Nuolatinės srovės maitinimo šaltinis iki 16 V
7. Asmeninis kompiuteris „AMD Athlon XP 1700“.
8. Asmeninis kompiuteris „Dell Latitude E6400“.

Naudojamas eksperimentams IHPGI IPG-1 pagamintas Lenkijos įmonėje „Faser S.A. IPG-1“ pagrindinės charakteristikos parodytos 4.1 lentelėje, o bendras vaizdas – 4.1 paveiksle.



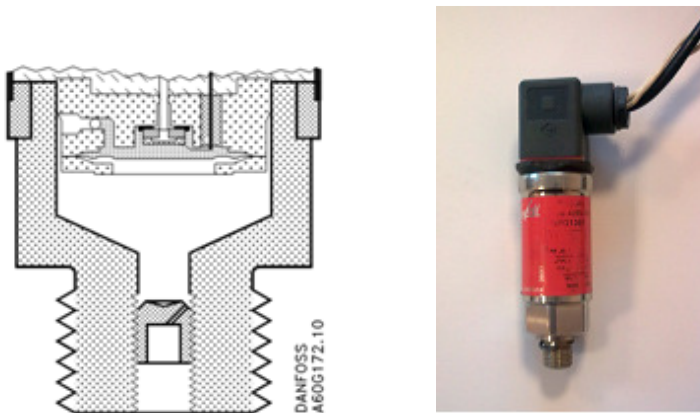
4.1 pav. IHPGI „Fazer IPG-1“
Fig. 4.1. IHPED „Fazer IPG-1“

4.1 lentelė. IHPGI „Fazer IPG-1“ techniniai duomenys
Table 4.1. Technical data of the IHPGI Faser IPG-1

Parametras	Reikšmė
Vandens čiurkšlės ilgis (gesinimo atstumas), m	2–5
Vandens čiurkšlių paleidimo dažnis, s	4–5
Vandens rezervuaro talpykla, dm ³	12
Suslėgtojo oro rezervuaras, dm ³ / MPa	4 /20
Suslėgtojo oro, tiekiamo į švirkštą, slėgis, MPa	2,5–2,7
Sudaromas slėgis vandens rezervuare, MPa	0,4
Apsauginio vožtuvo švirkšte suveikimas, MPa	3,0
Vandens rezervuaro apsauginio vožtuvo suveikimas, MPa	0,55
Masė:	
suslėgtojo oro rezervuaro, kg	6,25
vandens rezervuaro (be vandens) su nugarine nešiojimo ir sujungimo su švirkštu armatūra, kg	9,3
impulsinis švirkštas (neužpildytas), kg	6,5
bendra IPG-1 masė (užpildyto), kg	35

Skirtingo skersmens ir ilgio eksperimentiniai vamzdžiai yra tokių dydžių, kurie nurodyti 3.1 poskyryje.

Naudotas skaitmeninis fotoaparatas „Toshiba PDR-M70“, galintis fiksuoti 36 kadrus kas 0,07 s, slėgio jutiklis „Danfoss MBS 4050“ su integruotu pulsiniu slopintuvu skirtas darbui sunkiomis sąlygomis. Dažniausiai naudojamas hidraulikoje ir vandens pramonėje, kur dažnai pasitaiko hidraulinių smūgių ir kavitacijos reiškinių, dėl to darbinis slėgis viršijimas daug kartų. Integruotas pulsinis slopintuvas yra įvorė, įmontuota tarp matuojamos terpės ir daviklio jautriojo elemento (4.2 paveikslas.).



4.2 pav. Bendras MBS 4050 vaizdas
Fig. 4.2 The overall view of the MBS 4050

Kavitacija, hidrauliniai smūgiai hidraulinėse sistemose su kintančiu srautu yra dažni reiškiniai, kurie atsiranda, pvz., greitai užsidarant vožtuvams. Šie reiškiniai atsiranda ties vožtuvo įėjimo / išėjimo net esant labai mažiems slėgiams.

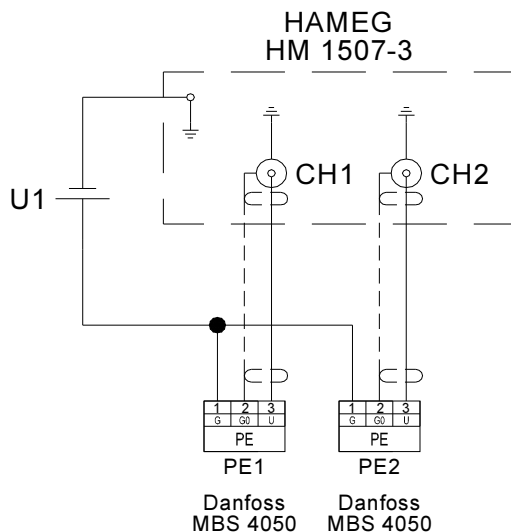
Terpėje esančios kietosios dalelės gali užkimšti integruotą pulsinį slopintuvą, todėl nuspręsta slėgio jutiklį montuoti vertikaliajoje pozicijoje, tai leistų sumažinti užsikimšimo riziką, nes srautas paleidimo metu bus apribotas. Terpės klampumas turi mažai įtakos slėgio jutiklio reakcijos laikui. Net esant 100 cSt klampumui, reakcijos laikas neviršija 4 ms.

Korpuso ir su terpe besiliečiančios dalys yra iš rūgščiai atsparaus nerūdijančiojo plieno (AISI 316L). Jutiklis yra atsparus elektromagnetiniams trikdžiams pagal ES EMC direktyvą. Jutiklio techninės charakteristikos pateiktos 4.2 lentelėje (MBS 4050).

4.2 lentelė. Pagrindiniai slėgio jutiklio „Danfoss MBS 4050“ techniniai parametrai
Table 4.2. The main technical data of the „Danfoss MBS 4050“ pressure sensor

Pagrindinės charakteristikos		
Tikslumas		±0,3 % matavimo srities MS (tipinis) ±0,8 % MS (maksimalus)
Netiesiškumas		<0,2 % MS
Matavimo histerezė		≤0,1 % MS
Temperatūrinis poveikis		≤0,1 % MS/10K
Reagavimo laikas, ms		≤4
Statinis leistinasis slėgis, MPa		150
Matavimo diapazonas, MPa		0–25
Elektrinės charakteristikos		
Išėjimo signalas, VDC		0–10
Maitinimo įtampa, VDC		15–30
Naudojama srovė, mA		<8
Priklausomybė nuo maitinimo įtampos, % MS/ V		<0,05 /10
Išėjimo varža, Ω		≤25
Aktyvios apkrovos varža, kΩ		$R_L \geq 15$
Aplinkos sąlygos		
Darbo temperatūra, °C		nuo –40 iki + 85
Temperatūros kompensacija, °C		nuo 0 iki + 80
Transportavimo temperatūra, °C		nuo –50 iki + 85
Elektromagnetinė emisija		EN 61000-6-3
Elektromagnetinis atsparumas		EN 61000-6-2
Izoliacijos varža, MΩ		>100 prie 100 V
Mechaninės charakteristikos		
Medžiagos	Su terpe kontaktuojančios dalys	DIN 17440-1.4404 (AISI 316 L)
	Korpusas	DIN 17440-1.4404 (AISI 316 L)
Proceso įjungimas		DIN 3852-G ¼ ANBR, O-ring
Elektrinis pajungimas		EN 175301-803, Pg9
Masė, kg		0,2–0,3

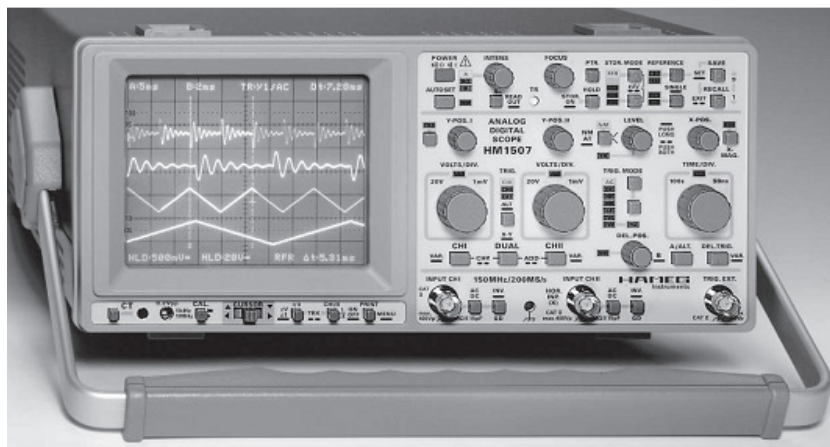
Slėgio jutiklių elektrinė principinė jungimo schema bandymų metu pateikta 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Slėgio jutiklių „Danfoss MBS 4050“ jungimo elektrinė schema:
PE1(2) – slėgio jutiklis MBS 4050; HM 1507 – oscilografas; U1 – nuolatinės srovės šaltinis; CH1(2) – matavimo kanalas

Fig. 4.3. The electrical wiring chart of the „Danfoss MBS 4050“ pressure sensors:
PE1(2) –pressure sensor MBS 4050; HM 1507 – oscilloscope; U1 –the source of direct current; CH1(2) – measurement channel

Analoginis/skaitmeninis oscilografas „Hameg HM 1507-3“, galintis matuoti du įeinančius signalus tuo pačiu metu. Bendras oscilografo vaizdas parodytas 4.4 paveiksle. Oscilografu gautų duomenų apdorojimas ir įvertinimas buvo vykdomas naudojant specialias programas SP 107 ir Scope 22.xla (*SP107 software*).



4.4 pav. „Oscilografas Hameg HM 1507-3“ bendras vaizdas
Fig. 4.4. „Overall Picture of the Hameg HM 1507-3“ oscillograph

Atliktų matavimų paklaida

Slėgio p_i matavimai

Slėgio daviklių „Danfoss MBS 4050“ tipinis matavimų tikslumas yra $\pm 0,3\%$ nuo matavimo srities (santykinė daviklio paklaida $\Delta_{MBS} = \pm 0,3\%$). Šiuo atveju tai sudaro $\pm 0,075$ MPa slėgio matavimo diapazonui $MS_p = 0 \div 25$ MPa (absoliuti daviklio paklaida $\Delta'_{MBS} = \pm 0,075$ MPa). Matavimo netiesiškumas $\leq 0,2\%$ nuo matavimo diapazono ($\leq 0,05$ MPa). Matavimo histerezė $\leq 0,1\%$ nuo matavimo diapazono ($\leq 0,025$ MPa) (4.2 lentelė).

Oscilografas HM 1507-3 turi 8 bitų analoginius skaitmeninius keitiklius (ASK) kiekvienam kanalui.

Prietaiso santykinė matavimo paklaida Δ_u įtampiniam įėjimui apskaičiuojama pagal formulę:

$$\Delta_u = \frac{1}{2^y} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

čia $y = 8$ – ASK bitų skaičius.

Matuojant naudojamo diapazono įtampinio įėjimo paklaida sudaro $\Delta_u = \pm 0,39\%$. Absoliuti įtampos matavimo paklaida:

$$\Delta'_u = \Delta_u \cdot MS_u, \quad (4.2)$$

čia MS_u – bandymų metu buvo naudojama matavimo skalė ($MS_u = 0-50 \cdot 10^{-3} \text{ V}$). Absoliuti matavimo paklaida šiuo atveju sudaro $\Delta'_u = \pm 0,19 \cdot 10^{-3} \text{ V}$. Santykinė prietaiso slėgio matavimo paklaida Δ_{pr} apskaičiuojama taip:

$$\Delta_{pr} = \frac{\Delta'_u \cdot k_1}{MS_p} \cdot 100\%, \quad (4.3)$$

čia: k_1 – transformacijos koeficientas, keičiant įtampą į slėgio reikšmes ($k_1 = 2,5 \text{ MPa / V}$); MS_p – slėgio matavimo sritis ($MS_p = 0 \div 25 \text{ MPa}$). Taigi $\Delta_{pr} = \pm 0,19 \cdot 10^{-2} \%$; absoliuti paklaida pagal (4.3) išraišką sudarys $\Delta'_{pr} = \pm 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}$.

Bendra santykinė slėgio matavimo paklaida Δ_p :

$$\Delta_p = \pm \sqrt{\Delta_{MBS}^2 + \Delta_{pr}^2}, \quad (4.4)$$

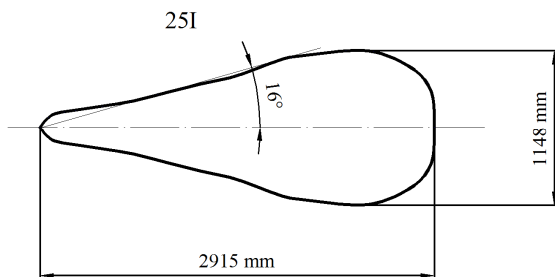
čia: $\Delta_{MBS} = \pm 0,3\%$; $\Delta_{pr} = \pm 0,19 \cdot 10^{-2} \%$; $\Delta_p = \pm 0,3\%$, nes Δ_{pr} yra palyginti labai mažas dydis. Bendra absoliuti slėgio matavimo paklaida pagal (4.4) išraišką: $\Delta_p = \pm 0,075 \text{ MPa}$ slėgio matavimo diapazonui $MS_p = 0 \div 25 \text{ MPa}$.

4.2. Įrenginio hidrodinaminių procesų eksperimentiniai tyrimai

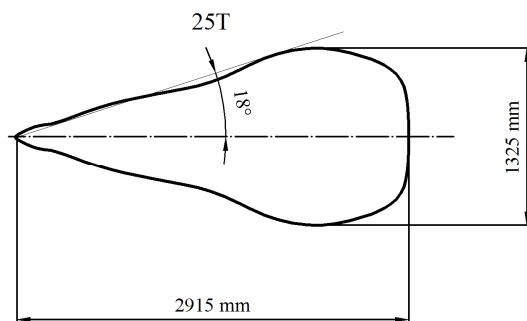
Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento Ugniagesių rengimo mokyklos Valčiūnų pratybų lauke ir Specialiojoje priešgaisrinėje gelbėjimo valdyboje.

A. Vandens srautų parametrų nustatymas

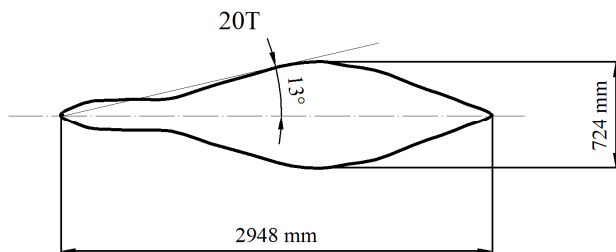
Fotografuojant išleistas iš eksperimentinių švirkštų 20T, 25T, 25I, 35T, 35I čiurkšles 5 m atstumu bei nustatant geometrinius vandens srautų parametrus, gauti duomenys parodyti 4.5–4.9 paveiksluose (Suslavičius, Bogdevičius 2005).



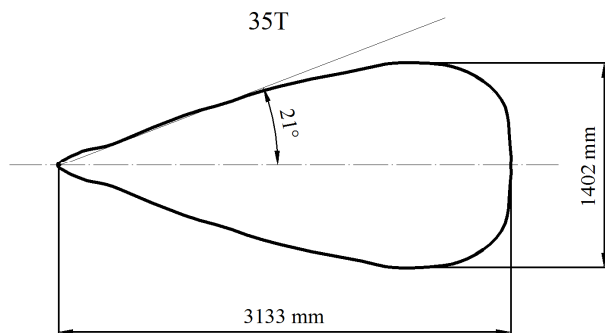
4.5 pav. Švirkšto 25I čiurkšlės bendras vaizdas
Fig. 4.5. Overall jet view of the 25I pipe



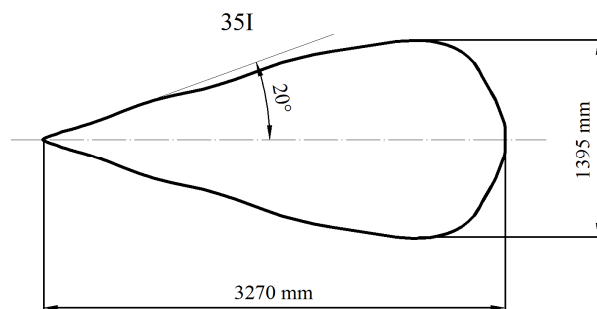
4.6 pav. Švirkšto 25T čiurkšlės bendras vaizdas
Fig. 4.6. Overall jet view of the 25T pipe



4.7 pav. Švirkšto 20T čiurkšlės bendras vaizdas
Fig. 4.7. Overall jet view of the 20T pipe

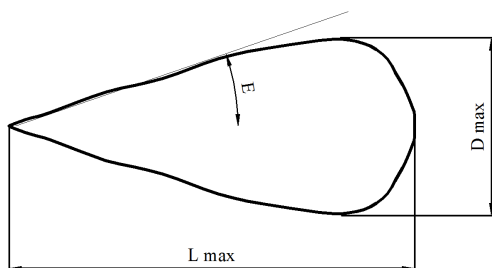


4.8 pav. Švirkšto 35T čiurkšlės bendras vaizdas
Fig. 4.8. Overall jet view of the 35T pipe



4.9 pav. Švirkšto 35I čiurkšlės bendras vaizdas
Fig. 4.2.5. Overall jet view of the 35I pipe

Vandens srautų koordinatės pateiktos B priede. Gautų vandens srautų iš skirtingų švirkštų parametrai apibendrinami pagal schemą, parodytą 4.10 pav., ir pateikiami 4.3 lentelėje.



4.10 pav. Čiurkšlių parametrų schema
Fig. 4.10. The parameters of the jets

4.3 lentelė. Eksperimentiniu būdu gautų vandens srautų duomenys

Table 4.3. Data of the experimentally obtained water sprays

Švirkšto vamzdžio tipas	E , laipsniais	$L_{\max}$, m	$P_{\max}$, m^2	T , kg/m^2
20T	13	2,948	0,411	0,487
25T	18	2,915	1,378	0,145
25I	16	2,915	1,035	0,193
35T	21	3,133	1,543	0,130
35I	20	3,270	1,525	0,131

P – vandens srauto užimamas maksimalus skerspjūvio plotas, T – vidutinis vandens kiekis, tenkantis paviršiaus plotui.

Naudojant gautus ir 4.3 lentelėje pateiktus duomenis bei pagal (2.30) formulę galima nustatyti skirtingiems švirkštų vamzdžio tipams reikalingus vandens tiekimo našumus bei intervalus tarp impulsų:

$$V_v = I \times P, \quad (4.5)$$

čia: V_v – vandens tiekimo našumas; I – normatyvinis vandens tiekimo intensyvumas ($I = 0,126 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$).

$$t_{\text{int}} = \frac{T}{I}, \quad (4.6)$$

čia t_{int} – laiko intervalai tarp impulsų.

Skaičiavimų rezultatus pateikiame 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė. Reikiamo vandens našumo ir intervalų tarp impulsų skaičiavimų duomenys

Table 4.4. Calculating results of the required water delivery capacity and intervals between pulses

Švirkšto vamzdžio tipas	T , kg/m^2	V_v , Kg/s	t_{int} , s
20T	0,487	0,052	3,865
25T	0,145	0,174	1,151
25I	0,193	0,130	1,532
35T	0,130	0,194	1,032
35I	0,131	0,192	1,040

B. Slėgio kitimo eksperimentinių vamzdžių viduje transportuojant vandenį nustatymas

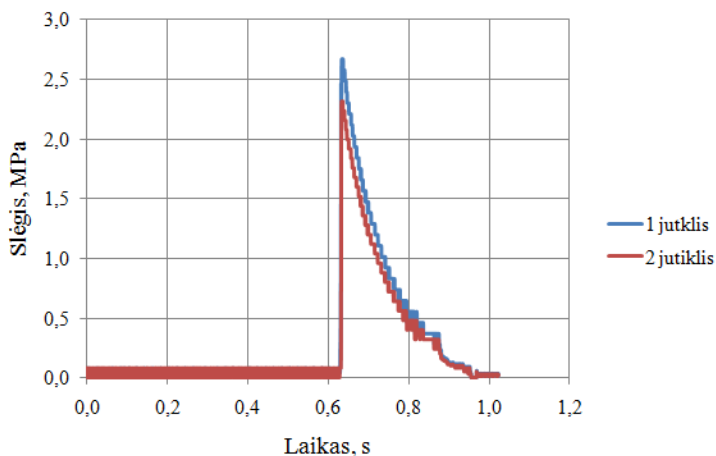
Siekiant nustatyti procesus, vykstančius HPGĮ eksperimentinių vamzdžių viduje, buvo naudojami pirmiau minėti jutikliai pagal 4.11 paveiksle parodytą schemą.



4.11 pav. Jutiklių MBS 4050 jungimo schemas bendras vaizdas

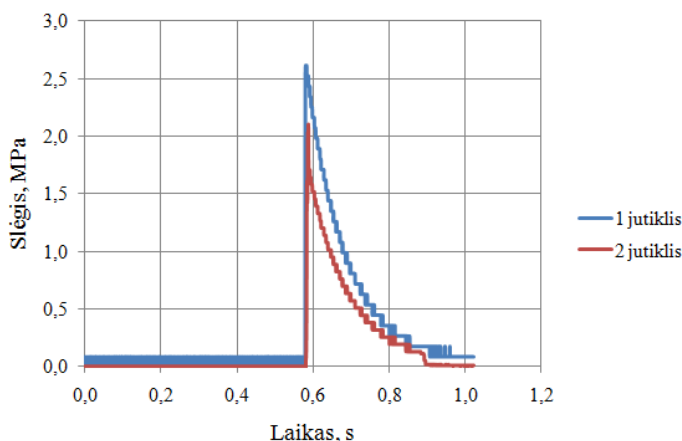
Fig. 4.11. Overall view of the MBS 4050 sensors wiring

1-asis slėgio jutiklis buvo jungiamas 160 mm atstumu nuo greitaveikio vožtuvo, o antras – 60 mm nuo 20T, 25T ir 35T vamzdžių išėjimo angos. Gauti eksperimentinių tyrimų duomenys pateikti grafinais pavidalais, pateiktais 4.12–4.14 paveiksluose.



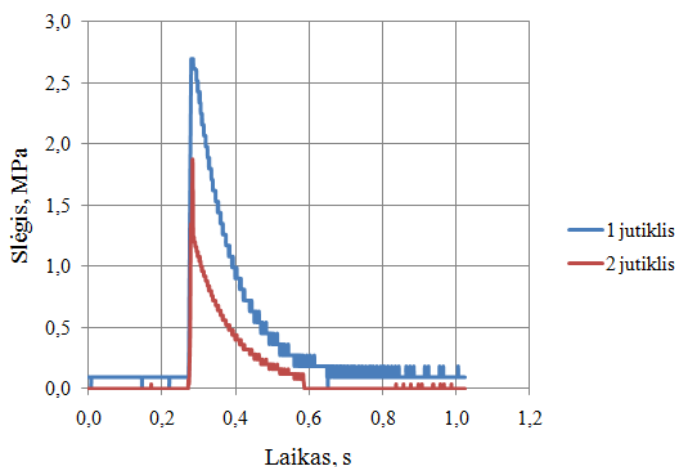
4.12 pav. Slėgio kitimas vandens išmetimo iš 20T vamzdžio metu

Fig. 4.12. The variation of pressure in the pipe 20T during water discharge



4.13 pav. Slėgio kitimas vandens išmetimo iš 25T vamzdžio metu

Fig. 4.13. The variation of pressure in the pipe 25T during water discharge



4.14 pav. Slėgio kitimas vandens išmetimo iš 35T vamzdžio metu

Fig. 4.14. The variation of pressure in the pipe 35T during water discharge

Tyrimų metu nustatyta, kad slėgis nurodytuose taškuose, atsidarius suslėgtojo oro kamrai, auga vidutiniškai apie 0,02 sekundės, o krinta – apie 0,3 sekundės, o visas procesas trunka 0,32 sekundės. Didžiausias slėgis, kuris nustatytas 1-uoju jutikliu, sudarė 2,7 MPa, o 2-uoju jutikliu – 2,32 MPa. Slėgio skirtumai tarp 1-ojo ir 2-ojo jutiklių didėja didėjant vamzdžio skersmeniui ir vamzdžiuose 20-T, 25-T ir 35-T atitinkamai sudarė 13 %, 19 % ir 30 %.

Gauti eksperimentiniu būdu slėgiai artimi gaunamiems sprendžiant matematinio IHPGĮ modelio lygtis ir parodytiems 3.15 pav. Tačiau tiesioginis jų lyginimas ribojamas tuo, kad naudojamo gamyklinio IHPGĮ suslėgtojo oro tiekimas iš oro rezervuaro į oro kamerą pro reduktorių gali skirtis iki 10 %.

4.3. Eksperimentinių tyrimų analizė

Naudojant hidrodinaminių procesų tyrimų metu gautus duomenis galima įvertinti įvairių švirkšto vamzdžių tipų tinkamumą gesinimui. Siekiant įvertinti tinkamumą nustatomi tokie rodikliai:

- galimas vandens kiekis skirtinguose švirkšto vamzdžiuose – $V_{šv}$, kg;
- galimas vieno impulso metu iš skirtingų švirkšto vamzdžių vandens kiekis, tenkantis paviršiaus plotui, K , kg/m²:

$$K = \frac{A_{šv}}{V_{šv}}, \quad (4.7)$$

- maksimalus periodas tarp vandens impulsų, užtikrinančių reikiamą vandens tiekimo į degantį paviršių intensyvumą ($I = 0,126 \text{ kg/m}^2\text{s}$), T_p , s:

$$T_p = \frac{K}{I}, \quad (4.8)$$

- galimas gesinimo plotas pasirinktu gesinimo laikotarpiu (10, 30 ir 60 sekundžių), kai ne trumpiau kaip 4 sekundes išlaikomas reikiamas vandens tiekimo intensyvumas į kiekvieną gesinamo paviršiaus kvadratinio metro plotą – atitinkamai N_i , m²:

$$N_i = \frac{t}{T_p} K, \quad (4.9)$$

čia t – pasirinktas gesinimo laikotarpis;

- naudotas vandens kiekis pasirinktu gesinimo laikotarpiu G , kg:

$$G = \frac{t}{T_p} V_{šv}, \quad (4.10)$$

- galimas vienodo ploto gesinimo su 12 litrų vandens laikas, užtikrinant ne trumpesnę kaip 4 sekundžių išlaikomą reikiamą vandens tiekimo intensyvumą į kiekvieną gesinamo paviršiaus kvadratinio metro plotą, t_g , s:

$$t_g = \frac{QT_p}{V_{šV}}, \quad (4.11)$$

čia Q – vandens kiekis 12 kg;

– gesinimo su 12 litrų vandens kiekiu plotas – N_{12}, m^2 :

$$N_{12} = \frac{t_g}{4} K. \quad (4.12)$$

Gesinant gaisrus dėl įvairių priežasčių (skirtingos medžiagos, skirtingai įkaitusi aplinka) negalima tiksliai nustatyti gesinimo laiko net ir tiekiant gesinimo medžiagas reikiamu intensyvumu. Todėl praktikoje yra nusistovėję tiekti gesinimui vandenį ta pačia kryptimi intervalais nuo 2 iki 5 sekundžių (Grimwood 1992; Suslavičius 1995; Hagan 1996; Grimwood 2002). Įvairiems švirkšto vamzdžiams vertinti pasirenkamas intervalas, lygus 4 sekundėms. Gauti duomenys pateikiami 4.5 lentelėje.

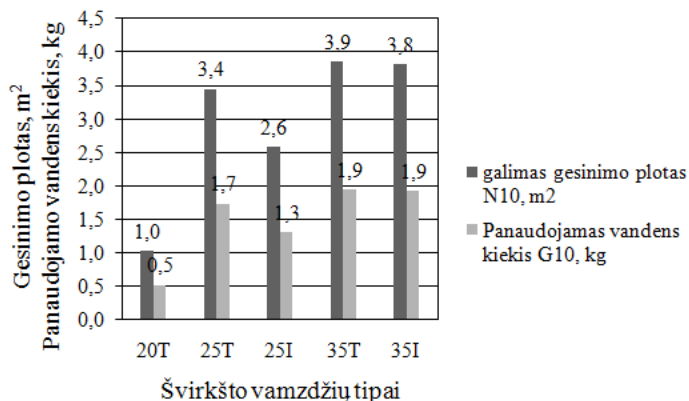
4.5 lentelė. Įvairių švirkšto vamzdžių vandens tiekimo gesinimui rodikliai

Table 4.5. Fire fighting performance in the case when water is discharged from different diameter pipes of the nozzle

Rodiklis	20T	25T	25I	35T	35I	IPG-1 gamyklinis
$V_{šv}, kg$	0,094	0,147	0,196	0,288	0,385	1,000
P_{max}, m^2	0,411	1,378	1,035	1,543	1,525	7,065
$K, kg/m^2$	0,229	0,107	0,189	0,187	0,252	0,142
T_p, s	1,815	0,847	1,503	1,481	2,004	1,123 neįmanomas
N_{10}, m^2	1,028	3,445	2,588	3,858	3,813	neužtikrina reikiamą intensyvumą
G_{10}, kg	0,518	1,736	1,304	1,944	1,922	
N_{30}, m^2	3,083	10,335	7,763	11,573	11,438	
G_{30}, kg	1,554	5,209	3,912	5,833	5,765	
N_{60}, m^2	6,165	20,670	15,525	23,145	22,875	
G_{60}, kg	3,107	10,418	7,825	11,665	11,529	
T_g, s	231,723	69,113	92,017	61,723	62,451	
N_{12}, m^2	23,810	23,810	23,810	23,810	23,810	

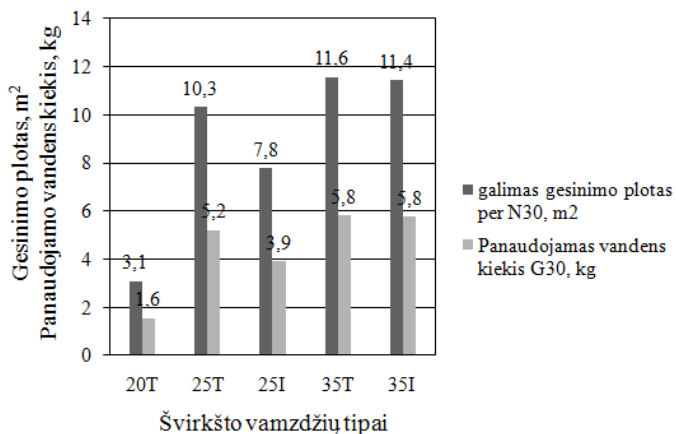
Pagal gautus duomenis sudaromi iš įvairių švirkšto vamzdžių nustatytų galimų gesinimo plotų ir suvartojamo vandens kiekio grafikai, kai gesinimas vykdomas 10, 30 ir 60 sekundžių ir kai ne trumpiau kaip 4 sekundes išlaikomas

reikiamas vandens tiekimo intensyvumas į kiekvieną gesinamo paviršiaus kvadratinio metro plotą. Grafikai pateikiami 4.15–4.17 paveiksluose.



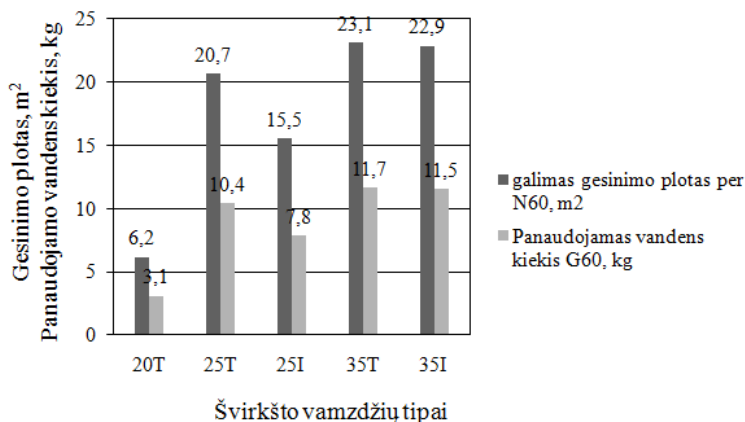
4.15 pav. 10 sekundžių gesinimo trukmės galimas gesinimo plotas ir vartojamo vandens kiekis

Fig. 4.15. Possible extinguishing area during 10 seconds duration of the extinguishing and the quantity of water used



4.16 pav. 30 sekundžių gesinimo trukmės galimas gesinimo plotas ir vartojamo vandens kiekis

Fig. 4.16. Possible extinguishing area during 30 seconds duration of the extinguishing and the quantity of water used



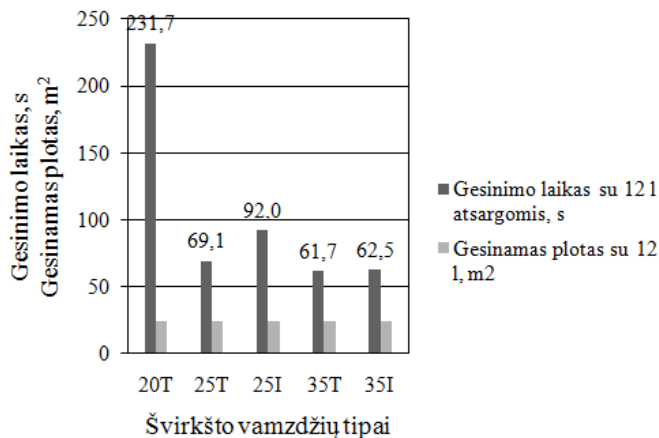
4.17 pav. 60 sekundžių gesinimo trukmės galimas gesinimo plotas ir vartojamo vandens kiekis

Fig. 4.17. Possible extinguishing area during 60 seconds duration of the extinguishing and the quantity of water used

Iš 4.15–4.17 paveiksluose pateiktų grafikų matyti, kad, tiekiant vandenį iš skirtingų vamzdžių 10, 30 ir 60 sekundžių, didžiausias plotas gesinamas 35T tipo vamzdžiu – 3,9 m², 11,6 m² ir 23,1 m² atitinkamai, o mažiausias – 20T tipo vamzdžiu – 1,0 m², 3,1 m² ir 6,2 m². Per pasirinktus vandens tiekimo laikus daugiausiai vandens vartojama su 35T vamzdžiu – 1,9 kg, 5,8 kg ir 11,7 kg atitinkamai. Tačiau šie kiekiai nėra dideli ir yra priimtini mobiliams IHPGĮ. Gauti tyrimo duomenys parodė, kad esamas IHPGĮ iš viso negali užtikrinti vandens tiekimo intensyvumo, reikalingo nedideliams gaisro židiniams gesinti. Tai patvirtina ir gesinimo praktika – norint efektyviai gesinti nedidelius židinius su esamais IHPGĮ, ugniagesiams tenka naudoti jų po du, tuo padidinant bendrą vandens tiekimo intensyvumą.

To paties ploto galimo gesinimo laiko su naudojamu vienodu visiems švirkšto vamzdžiams vandens kiekio atsargomis (12 litrų) grafikas pateiktas 4.18 paveiksle.

Naudojant visų tipų vamzdžius ir 12 l vandens atsargas, reikiamu vandens tiekimo intensyvumu galima gesinti vienodą plotą, bet skirtingą laiką. Gauti duomenys rodo, kad su 12 l vandens atsargomis į galimą gesinimo plotą vanduo reikiamu intensyvumu greičiausiai bus patiektas su 35T tipo vamzdžiu, t. y. per 61,7 sekundės, o lėčiausiai su 20T tipo vamzdžiu – per 231,7 sekundės. Vandens tiekimo laikas yra labai svarbus, nes gesinamas iš karto ne visas plotas, o atskiros zonos. Todėl greitesnis vandens tiekimas į numatomą plotą mažina galimą gaisro židinio plėtimąsi.



4.18 pav. Vienodo ploto gesinimo su 12 l vandens atsargomis laikas

Fig. 4.18. Extinguishing time of equal area with 12 litres water capacity

Apibendrinus ir įvertinus grafikuose parodytus gautus duomenis nustatoma tokia švirkšto skirtingų vamzdžių priimtinumo eilė (tinkamiausias – pirmas, toliau – pagal rodiklius tinkamumo mažėjimo tvarka):

1. 35T,
2. 35I,
3. 25T,
4. 25I,
5. 20T.

Su švirkšto vamzdžiu 35T, tiekiant vandenį gesinti nurodytomis sąlygomis, galima gesinti didesnę plotą nei su kitais eksperimentiniais švirkšto vamzdžiais. Gesinant vienodo gaisro židinio plotą teorinis gesinimo laikas su švirkšto vamzdžiu 35T yra trumpiausias.

4.4. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Eksperimentiniai hidrodinaminiai tyrimai patvirtina IHPGĮ sudaryto matematinio modelio ir jo dinaminių bei hidrodinaminių procesų modeliavimo pagrįstumą. Eksperimentinių tyrimų metu vamzdžių gale nustatytas maksimalus slėgis 2,32 MPa, o skaitiniu būdu gautas maksimalus slėgis vamzdžiuose yra 2,29 MPa. Slėgio skirtumai neviršija suslėgtojo oro tiekimo per reduktorių esamą paklaidą (iki 8 proc.).

2. Taikomas iš IHPGĮ išleistų vandens čiurkšlių fotografavimo metodas leidžia nustatyti jų parametrus, kuriais remiantis įvertinamas galimas gesinimo efektyvumas.

3. Remiantis gautais eksperimentiniais duomenimis ir atlikta analize, įvertinant iš eksperimentinių vamzdžių išleistų čiurkšlių parametrus, nustatytas šių vamzdžių priimtinumai ir veiksmingumas. Nustatytas priimtinausias naudoti švirkšto vamzdis yra 35T. Jis per tą patį laiką vandenį gali tiekti į didžiausią plotą ir su tomis pačiomis vandens atsargomis užtikrina trumpiausią gesinimo laiką.

Bendrosios išvados

Atlikus teorinius ir eksperimentinius žinomų IHPGĮ bei sukurto racionalių parametrų automatinio IHPGĮ darbo procesų tyrimus, suformuluotos šios mokslinės ir praktinės išvados:

1. Nustatytas ryšys tarp gesinti naudojamo vandens šiluminio imlumo ir jo susmulkinimo į atskirus lašus. To paties vandens tūrio šilumos sugėrimo savybių naudojimas priklauso nuo to tūrio susmulkinimo į atskirus lašelius ir šių lašelių judėjimo greičio. Gauta lašelių dydžio ir greičio priklausomybė leidžia nustatyti reikšmes, reikalingas nedideliems gaisro židiniams gesinti. Kad lašeliai pasiektų gesinamą paviršių, esant 120 m/s greičiui, jų skersmuo turi būti ne mažesnis kaip 1,8 μm .

2. Sudarytas IHPGĮ hidrodinaminių procesų matematinis modelis, įvertinantis suslėgtojo oro ir skysčio (vandens) tarpusavio sąveiką. Modelis leidžia nagrinėti suslėgtojo oro slėgio, vandens kiekio, IHPGĮ geometrinių parametrų įtaką vandens transportavimo procesui. Nustatyta, kad jei suslėgtojo oro kameros tūris – 1,5 litro, slėgis joje – 2,7 MPa, greitaveikio vožtuvo suveikimo laikas – 10 ms ir vamzdžio skersmuo – 0,06 m, išstumiamas vandens srautas pasiekia iki 80 m/s greitį.

3. Sudarytas automatinio IHPGĮ dinaminių ir hidrodinaminių procesų matematinis modelis, įvertinantis automatinio valdymo mechanizmo veikimą. Modelis leidžia nustatyti automatinio valdymo mechanizmo sudedamųjų dalių pa-

rametrų įtaką vandens transportavimo impulsų dažniui, t. y. vandens tiekimo intensyvumui. Nustatyta, kad esant racionaliems automatinio IHPGI parametrams vandens išstūmimo dažnis yra 0,68 Hz.

4. Sudarytas IHPGI ir naudotojo, kaip biomechaninės sistemos, sąveikos vandens išstūmimo metu matematinis modelis. Jis leidžia įvertinti vandens išmetimo metu atsirandančių jėgų kitimus, veikiančius naudotoją. Nustatyta, kad esant 2,7 MPa suslėgtojo oro kameros slėgiui ir išstumiant 1 kg masės vandens kiekį, maksimali atatrakos jėga siekia 7,76 kN. Panaudojus nustatytą racionalesnę vandens kamerą, galima pasiekti iki 33 % didesnę vandens, transportuojamo IHPGI į gaisro židinius, greitį ir gauti iki 37 % mažesnę jėgą, veikiančią naudotoją.

5. Sukurtas originalus automatinis IHPGI (Lietuvoje registruotas patentas LT 5436 B), galintis periodiniu impulsiniu būdu išmesti vandens srautą į gaisro židinius nustatomu dažniu. Sukurtas automatinis IHPGI gali būti pasiūlytas naudoti priešgaisrinėms gelbėjimo tarnyboms gesinti nedidelius gaisro židinius. Tai leistų pagreitinoti tokių židinių gesinimą, taupyti materialinius išteklius ir finansines lėšas, sumažinti nuostolius, atsirandančius dėl vandens poveikio.

6. Sukurta programinė įranga IHPGI dinaminiais ir hidrodinaminiais procesams vertinti, panaudojant *Compaq Visual Fortran Professional v 6.3* programinį paketą. Naudojant programinę įrangą galima taikyti IHPGI diegti įvairiuose transporto objektuose: traukiniuose, laivuose, skraidymo aparatuose, kovinėse ir specialiosiose mašinos.

Literatūra ir šaltiniai

Adiga, K. C.; Robins, W. 2006. *CFD Simulation Accelerates Development of New Fire Suppression Technology* [interaktyvus], [žiūrėta 2006 m. kovo 10 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.cfdreview.com>>.

Aladjev, V.; Bogdevicius, M. 1999. *Solution of Physical, Technical and Mathematical Problems with Maple V*. Vilnius. 686 p.

Aladjev, V.; Bogdevicius, M. 2001. *Maple 6: Solution of the Mathematical, Statistical and Engineering – Physical Problems*. Laboratory of Basic Knowledges. Moscow. 824 p.

Aladjev, V.; Bogdevičius, M.; Prentkovskis, O. 2002. *New Software for Mathematical Package Maple 6, 7 and 8*: monograph. Vilnius. 404 p.

Barker, S. 1996. Greater Manchester County Fire Service Evaluates the IFEX 3000. *Fire Research News*, Issue 20.

Bercovitz, J. *Hatcher's Notebook* [interaktyvus], 2007 [žiūrėta 2007 m. balandžio 17 d.]. Prieiga per internetą: <http://yarchive.net/gun/hatchers_notebook.html>.

Bogdevicius, M. 1991. *Calculation of a Non-stationary Movement of a Liquid in Elastic-Plastic and Elastic-Viscous-Plastic Pipelines*. University Stuttgart, Institute of Hydraulic Machines. 48 p.

Bogdevicius, M. 1997. Pump hydraulic system simulation by the characteristic method, *Transportas* [Transport Engineering] 2(15): 30–37.

Bogdevicius, M. 1999. Simulation and Interaction of Mechanical and Hydraulic System, in *Proceedings of Tenth World Congress on the Theory of Mechines and Mechanisms*, Oulu (Finland), 2110–2115.

Bogdevicius, M. 2000a. Simulation of complex pneumatic system, *Transport* 15(1): 20–28.

Bogdevicius, M. 2000b. *Simulation of Dynamic Processes in Hydraulic, Pneumatic and Mechanical Drivers and their Elements*. Vilnius: Technika. 96 p.

Bogdevičius, M.; Prentkovskis, O. 2003. *Hidraulinių ir pneumatinių sistemų dinamika*. Vilnius: Technika, 165–174.

Bogdevičius, M.; Suslavičius, V. 2007 07 25. *Automatinis hidraulinis ir pneumatinis gesinimo švirkštas*. Lietuvos patentas Nr. LT 5436 B.

Cone-angles, Droplet sizes, Discharge velocities and Flow-rates for optimal 3D offensive gas-cooling applications [interaktyvus], 2008 [žiūrėta 2008 m. birželio 5 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.firetactics.com/angles-droplets-flows.htm>>.

Croser, P. 1989. *Pneumatics. Basic Level*. Festo Didactic KG, Esslingen.

Cwiok, T. 2009. A magic mist. *American Investor Magazine*, February. American Chamber of Commerce in Poland.

Davis, S.; 2000. A Review of Fire Fighting Water Requirements, in *Fire Engineering Research Report 2000/03*, ISSN 1173-5996, Christchurch. 100 p.

Drysdel, D. 1992. *Fire Dynamics*. New York: A Wiley-Interscience Publication.

Elagin, A.G. 2005. Firemen pour – insurers pay twice. *Means of Rescue. Fire Protection - 2005*. Vol 5. Moscow.

Extinguishmist [interaktyvus], 2010 [žiūrėta 2010 m. rugsėjo 15 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.telesto.pl/en/extinguish/>>.

Fire extinguishers [interaktyvus], 2009 [žiūrėta 2009 m. rugsėjo 14 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.minimax.de/en/produkte/loescher/feinsprueh/>>.

Fire Safety. 2003. Scientific-Technical Journal, VNIPO, 2-2003, Moskow. 251 p.

Firefighting Foam Products [interaktyvus], [žiūrėta 2006 m. gegužės 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ansul.com/en/Products/foam_prod/foam_list.asp>.

Fleming, J. W.; Awtry, A.; Sheinson, R. S.; Ayers, S. 2005. Fire suppression propeerties of very fine water mist, *Chemical/Biochemical Research*, NRL Rewiew, 121–123.

Foam Concentrates [interaktyvus], 2008 [žiūrėta 2008 m. gruodžio 19 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.kiddefire.com/utcfs/templates/pages/template50/0,8061,pageid%3d3497%26siteid%3d465,00.html>>.

Fung, Y. C. 1993. *Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues*. Springer-Verlag, New York. 568 p.

Gameiro, V. M. 1993. *Fine water sprays fire suppression alternative to halon 1301 in gas turbine enclosures*, in *Proceedings Halon Alternatives Technical Working Conference* (11–13 May 1993). National Institute of Standards and Technology (NIST SP 984-4). Springfield, VA, 317–344.

Grant, G.; Renton, J.; Drysdale, D. 2000. Fire suppression by water sprays, in *Progress in Energy and Combustion Science* 26: 79–130.

Grimwood, P. 2002. *Flashover and Nozzle Techniques*. Crisis and Management Centre. CEMAC-DCI TGG-004, Dordrecht. 41 p.

Grimwood, P. 2005. Primary attack, *Fire Prevention and Fire Engineers Journal* July: 45–47.

Grimwood, P. T. 1992. *Fog Attack*. FMJ International Publications Ltd. 65 p.

Grosshandler, W.I. 1994. *Evaluation of Alternative In-Flight Fire Suppressants for Full-scale Testing in Simulated Aircraft Engine Nacelles and Dry Bays*. National Institute of Standards and Technology (NIST SP 861). Springfield, VA. 859 p.

Gyventojų skaičius [interaktyvus], 2011 [žiūrėta 2011 m. kovo 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://db1.stat.gov.lt/statbank/selectvarval/saveelections.asp?MainTable=M3010101&PLanguage=0&TableStyle=&Buttons=&PXSId=7743&IQY=&TC=&ST=ST&rvar0=&rvar1=&rvar2=&rvar3=&rvar4=&rvar5=&rvar6=&rvar7=&rvar8=&rvar9=&rvar10=&rvar11=&rvar12=&rvar13=&rvar14=>>>.

H₂O₃ Flexibility for industry [interaktyvus], 2009 [žiūrėta 2011 m. sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.aquasys.at/en/home/hspan_classsmaller2spanospan_classgreater3span/>>.

Hadjisophocleus, G. V.; Richardson, J. K. 2001. Water flow demands for firefighting. Springer Science, *Fire Technology* 41: 173–191.

Hagan, R. D.; Bernhard, R. D.; Jacobs, K. A.; Farley, J. P.; Ramirez, L. R.; Feith, S. J.; Hodgdon, J. A. 1996. *Offensive Fog Water Attack Reduces Firefighting Time and Head Strain During Shipboard Firefighting*. Naval Health Research Centre. Report No 96–22, San Diego, CA. 13 p.

Hale CAFS products [interaktyvus], 2004 [žiūrėta 2004 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.haleproducts.com/main/productcategories,55,68.aspx>>.

Hart, R. A.; Ren, T. X.; Edwards, J. S. 2003. Numerical simulation of water mist suppression of tunnel-fire scenarios, in *Third International Conference on CFD in Minerals and Process Industries CSIRO*, Melbourne, Australia, 35–40.

Hatcher, J. S. 1957. *Hatcher's Notebook. A Standard Reference Book for Shooters, Gunsmiths, Ballisticians, Historians, Hunters, and Collectors*. Harrisburg, PA.

Hewitt, A.; O'Donnell, C.; Dorr, G.; Woods, N. 2006. Droplet Size and Velocity Distributions for IFEX Impulse Fire Extinguisher. University of Queensland. Report No 0905/786, Queensland. 17 p.

HI-FOG for cruise ships [interaktyvus], 2008 [žiūrėta 2011 m. sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.marioff.com/applications/marine-and-offshore/en_GB/cruise-ships/>.

IFEX 3001. Impuls gun [interaktyvus], 2002 [žiūrėta 2002 m. vasario 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ifex3000.de/eng/impulse_gun.php>.

IFEX 3012 Fire Fighting Equipment. Instructions for Use and Operation. 2001. IFEX-GmbH, Sittensen.

IFSTA. 1990. *Fire Stream Practice*. Fire Protection Publications. Oklahoma State University. 464 p.

Igla-1-0,4 [interaktyvus], 2010 [žiūrėta 2010 m. lapkričio 21 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.fireman.ru/PTV/ptv/igla/igla1.htm>>.

Impulse fire extinguishing technology [interaktyvus], 2010 [žiūrėta 2010 m. gruodžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.ifexuk.com/hiw.htm>>.

Johnson, B. 1991. *Fire Research News. Home Office*. Issue 13. London. 45 p.

Karpenchuk, I. 2006. Technical calculation of cavity nozzle for getting water mist, Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций, *Научно-технический журнал* 1(19)6: 62–68.

Kincaid, D. C.; Longley, T. S. 1989. A water droplet evaporation and temperature model, *Transactions of American Society of Agricultural Engineers* 32(2): 457–463.

Laine, J.; Groonwald, R. 2010. *Ultra high pressure Technology Improves Firefighting Capabilities. Fire Apparatus Magazine*. Pennwell. Vol 15.

Larson, M.; Westerlund, J. 2006. *High Pressure Fire Fighting – Basic Decision Data For The Fire Service*. Lund University, Sweden: Report 5184.

Lietuvos Respublikos priešgaisrinės saugos įstatymas, *Žin.*, 2002, Nr. 123-5518.

Lithuanian Academy of Science [elektroninis išteklius], in *Proceedings of the 9th International Conference, Held on 16–18 May, Vilnius, Lithuania [CD]* / IABSE Lithuanian, p. [1–6].

Liu, Z.; Kim, A. K. 2000. A review of water mist fire suppression systems - fundamental studies, *Journal of fire Protection Engineering* 10(3): 32–50.

LST EN 2: 1996 Gaisrų klasifikavimas (tapatus EN 2:1992). Vilnius. 1996. 3 p.

Marioff, H. 2006. High pressure water mist: how the technology works, *Asia Pacific Fire Magazine*, Issue 20: 41–44.

Mawhinney, J. R. 2003. *Water Mist Fire Suppression Systems*. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts.

MBS 4050. Pressure transmitters with pulse snubber [interaktyvus], [žiūrėta 2005 m. spalio 21 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.danfoss.com/Products/Categories/Detail/IA/Pressure-transmitters/MBS-4050-Pressure-transmitters-with-pulse->

snummer/060G2164/886543f0-1b91-4fa9-bbcf-c6dbf3ef068b/9417f211-a693-41e7-8513-a37dab61ae3b.html>.

NFPA 1145 *Guide for the Use of Class A Foams in Manual Structural Fire Fighting*. Quinsy, Massachusetts, 2006. 19 p.

Noguchi, S.; Okubo, S.; Miyasaka, M. 2000. Development of pneumatic atomizing gun for fire fighting, in *Fifteenth Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety. March 1-7*, Vol 1, NISTIR 6588, 300–305.

Priešgaisrinės apsaugos ir gelbėjimo departamento prie LR VRM statistika [interaktyvus], 2011 [žiūrėta 2011 m. kovo 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.vpgt.lt/index.php?-18918438>>.

Sardqvist, S. 1996. *An Engineering Approach to Fire-Fighting Tactics*. Lund University, Lund.

Scheffey, J. L.; Williams, P. W. 1991. NFPA's *Fire Technology*. November.

Sirignano, W. A. 2000. *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays*. Cambridge University Press.

SP107 software [interaktyvus], [žiūrėta 2006 m. vasario 17 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.hameg.ru/software.0.html?&L=1%25253Fsplash&tx_hmdownloads_pil\[page\]=2&tx_hmdownloads_pil\[language\]=&tx_hmdownloads_pil\[product\]=&tx_hmdownloads_pil\[search\]=&tx_hmdownloads_pil\[hits\]=>](http://www.hameg.ru/software.0.html?&L=1%25253Fsplash&tx_hmdownloads_pil[page]=2&tx_hmdownloads_pil[language]=&tx_hmdownloads_pil[product]=&tx_hmdownloads_pil[search]=&tx_hmdownloads_pil[hits]=>)>.

Suslavičius, V. 1995. *Šiuolaikinių švirkštų purkštuvų veikimo principai ir techninės galimybės*. Vilnius: Priešgaisrinės apsaugos departamentas.

Suslavičius, V. 2000. *Gelbėjimo darbai, atliekami kelių eismo įvykių metu*. Vilnius: Priešgaisrinės apsaugos departamentas. 112 p.

Svensson, S. 2002. *The Operational problem of fire control*. Lund University, Department of Fire Safety Engineering. Report LUTVDG/TVBB-1025-SE. 231 p.

The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer as either adjusted and/or amended in London 1990, Copenhagen 1992, Vienna 1995, Montreal 1997, Beijing 1999. *United Nations Environment Programme*. 54 p.

Toshiba PDR M 70, Instruction manual. Toshiba America Information Systems, Inc., California. 142 p.

Waterous CAFS systems [interaktyvus], 2004 [žiūrėta 2004 m. balandžio 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.waterousco.com/CAFSsystems/>>.

Wieder, M. A.; Smith, C.; Brackage, C. 1992. *Essential of Fire Fighting*. Third edition. The International Fire Service Training Association. Fire Protection Publications. Oklahoma State University. 311 p.

Zegers, E. J. P.; Williams, B. A.; Sheinson, R. S.; Fleming, J. W. 2000. Dynamics and suppression effectiveness of monodisperse water droplets in non-premixed counterflow flames, in *Proc. Combust. Inst.* 28, 2931–2938.

Асташев, В. К.; *et al.* 1981. *Вибрации в технике. Защита от вибраций и ударов. 6 том. Машиностроение.* Москва. 456 с.

Баграмов, С. Е.; Зверев, И. И.; Пономаренко, В. К.; Фролов, Д. И.; Черняк, Н. В.; Чиковани, В. В. 1969. *Термодинамика, теплопередача и основы теории горения.* ЛВИКА им. А. Ф. Можайского. Ленинград.

Иваницкий, А. Г. 2008. Влияние конструктивных и эксплуатационных параметров стволов установок импульсного пожаротушения на гидродинамические характеристики истечения жидкости, *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь* вып. 28, 31–35.

Иванников, В. П.; Ключ, П. П. 1987. *Справочник руководителя тушения пожара.* Москва: Стройиздат.

Новосад, А. П.; Попов, И. А. 2009. Классификация импульсных установок пожаротушения, в кн. *Загальнонаукові і спеціальні дослідження. Збірник наукових праць СХУЯЕтаП.* Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности. Севастополь, 133–139.

Новые технологии пожаротушения [interaktyvus], 2010 [žiūrėta 2010 m. gruodžio 16 d.]. Prieiga per internetą: < http://www.tempero.ru/systems/backpack_plant/ >.

РУПТ-1-0,4 [interaktyvus], 2005 [žiūrėta 2006 m. kovo 12 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.poztech.ru/rupt.htm>>.

Савельев, И. В. 1977. *Курс общей физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика.* Москва: Наука. 416 с.

Тычин, Н. А. 1997. *Разработать теорию, устройство и технологию импульсной подачи воды в зону горения.* Отчет НИР. ГР 1997760. РНПЦ ПБ ГУВПС МВД Респ. Беларусь. 316 с.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Suslavičius, V.; Bogdevičius, M. 2008. New automatic impulse extinguishing device, *Transport* 23(2): 124–128. ISSN 1648-4142 (*ISI Web of Science*).

Bogdevičius, M.; Suslavičius, V. 2005. Investigation of hydrodynamic processes of the extinguishing device, *Transport* 20(6): 219–224. ISSN 1648-4142.

Bogdevičius, M.; Suslavičius, V. 2006. Hydrodynamic processes of the impulse fire extinguishing, *Transport and Telecommunication* 7(2): 342–349. ISSN 1407-6160.

Suslavičius, V.; Bogdevičius, M. 2003. Improvement of technical parameters of fire vehicles and equipment, *Transport* 18(2): 89–96. ISSN 1648-4142.

Straipsniai kituose leidiniuose

Bogdevičius, M.; Janutėnienė, J.; Suslavičius, V. 2008. The hydrodynamics behavior of automatic extinguishing system, in *Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power*. Toyama, Japan, 753–758. ISBN 493107007X.

Bogdevičius, M.; Suslavičius, V. 2007. Investigation of dynamic process of automatic extinguishing, in *12th World Congress in Mechanism and Machine Science IFToMM*

2007, Besancon, France, 17–21 June, Besanson - France [elektroninis išteklis] / Comité Français pour la Promotion de la Scien, 1–5. ISBN 9789659113804.

Bogdevičius, M.; Suslavičius, V. 2007. Investigation of Hydrodynamic Processes of the Extinguishing Device, in *The 9th International Conference on „Modern Building Materials, Structures and Techniques“*, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 16–18 May 2007. Vilnius, Lithuania / IABSE Lithuanian Group, Lithuanian Academy of Science, 485–486 [elektroninis išteklis]: proceedings of the 9th international conference, held on 16–18 May 2007 Vilnius, Lithuania [CD] / IABSE Lithuanian, 1–6. ISBN 9789955281894.

Bogdevičius, M.; Suslavičius, V. 2006. Investigation of Hydrodynamic Processes of the Automatic Impulse Extinguishing, in *The XVIII International Conference on „Material Handling, Constructions and Logistics“*, University of Belgrad, Faculty Engineering, Department of Material Handling and Design Engineering, 19–20 October 2006. Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade, 249–254. ISBN 8670835711.

Aladjev, A.; Bogdevičius, M.; Suslavičius, V. 2006. Investigation of hydrodynamic processes of the extinguishing device evaluating interaction between gas and liquid, in *Transport Means - 2006: Proceedings of the 10th International Conference*, 19–20 October 2006, Kaunas, Lithuania / Kaunas University of Technology, IFTOMM National Committee of Lithuania, SAE Lith, 110–115. ISSN 1822-296 X.

Aladjev, A.; Bogdevičius, M.; Suslavičius, V. 2005. Hydrodynamic Process in the Extinguishing Device, in *Proceedings of the 9th International Conference “Transport Means 2005”*, 20–21 October 2005, Kaunas University of Technology, Lithuania. Kaunas: Technologija, 159–164. ISSN 1822-296 X.

Suslavičius, V.; Aladjev, V. 2003. Gaisrinių automobilių ir jų įrangos tobulinimas, iš 4-osios tarptautinės konferencijos „Transbaltica-03“, įvykusios Vilniuje 2003 m. balandžio 10–11 d., mokslinių pranešimų rinkinys. Vilnius: Technika, 339–352. ISBN 9986-05-648-9 (918).

Suslavičius, V.; Bogdevičius, M. 2005. Nedidelių gaisro židinių gesinimo įrangos parametrų tyrimas bei jos tobulinimas, iš 8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2005 m. gegužės 12 d., pranešimų rinkinys. Vilnius: Technika, 111–117. ISBN 9986-05-849-X (1128).

Suslavičius, V.; Bogdevičius, M. 2004. Nedidelių gaisro židinių gesinimo įrangos tobulinimas, 7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2004 m. balandžio 29 d., pranešimų rinkinys. Vilnius: Technika, 32–39. ISBN 9986-05-717-5 (982).

Suslavičius, V. 2002. Gaisrinių automobilių techninių parametrų gerinimo būdai, iš 5-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 2002 m. gegužės 22 d., medžiaga. Transportas Vilnius: Technika, 228–238. ISBN 9986-05-522-9.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

The effectiveness of fire extinguishing largely depends on the transportation of fire-extinguishing fluid (via the extinguishing devices to the place of ignition). The research into the peculiarities of fire extinguishing fluid transportation allows us to determine the optimal tools to be used for extinguishing fire on the particular sites. It should be noted that the investigations of fire extinguishing fluid transportation to the small-scale fire sites are incomplete, and this makes the choice of the appropriate equipment a difficult task. The present dissertation aims to investigate hydrodynamic processes taking place in the device used for transportation of fire-extinguishing fluids, as well as the effect of these processes on users of the equipment, and to construct mathematical models, helping to select devices with the required characteristics in each particular case.

Topicality of the thesis

Ineffective use of water for extinguishing fire leads to losses due to a harmful water effect, which often exceeds the damage done by the fire to property and other valuable things of the people. The analysis of the literature and patents on the problem shows that the research in this area is carried out in many countries. To solve this problem, various methods of water supply, based on the use of dynamic and positive displacement water pumps, as well as the compressed gas power, are applied.

The extinguishing of a small fire requires much less effort and resources than the liquidation of an extensive fire. The faster the fire is extinguished, the better protected are the human lives, health and property from the damage caused by fire. In a modern society, provided with highly developed communication and information systems, it is possible to inform quickly a fire and rescue service about the fire. If the number of fire brigades is sufficient in a particular locality, they can quickly arrive at the site of a fire and extinguish it at the initial stage. Therefore, according to the statistical data, more than 50 % of all fires are extinguished by using only a single fire nozzle. It is clear that the availability and effective application of fire extinguishing equipment designed for small-scale fires could allow for extinguishing most of the fires. The use of this equipment helps fire and rescue services quicker reach the arising fires, which can be extinguished with minimal resources. Therefore, the devices of this type are often included in the list of equipment of the fire-engines or other rescue vehicles. However, the equipment used by fire and rescue services for water transportation now, which consists of centrifugal fire pumps, fire hoses and spray nozzles is not adapted to extinguishing small-scale fires. When they are used, too much water is consumed in the process of fire extinguishing.

The analysis shows that the equipment supplying the water, based on the use of the compressed air power, is best suited for extinguishing small-scale fires. Such equipment is produced by various world companies, e.g. Ifex Technologies (Germany), Faser (Poland), Tempero (Russia), Sakura KK (Japan) and ADA Technologies Inc. However, the devices considered have not been completely developed and their parameters are far from being optimal (e.g. they are heavy and their fire extinguishing power is not high). For these reasons, fire and rescue services are usually reluctant to purchase and to use them.

To satisfy the requirements of Lithuanian State Fire and Rescue Service, the impulse-based fire extinguishing devices IFEX 3012 and Faser IPG-1 were purchased. These devices have demonstrated that water may be more effectively used for fire extinguishing. However, during the use of the equipment, some drawbacks could be observed, such as insufficient intensity of water transportation to burning surfaces, heavy weight of devices and significant recoil of the device during water expelling. These drawbacks of fire extinguishing devices used for extinguishing small-scale fires emerged because of the insufficient research into the problem of their development.

The devices for transporting fire-extinguishing fluids, based on the compressed air power, could be a part of automatic fire extinguishing systems installed on vehicles or stationary objects.

The object of research

The object of research of the dissertation includes the dynamic and hydrodynamic processes taking place in fire extinguishing fluid transportation and the hydraulic and pneumatic extinguishing device.

The aim of the thesis

The main aim of the thesis is the determination of the parameters of the dispersed water transported via a particular device, which are the best suited for extinguishing small-

scale fires and the development of a mathematical model of the hydraulic and pneumatic processes.

The tasks of the thesis

In order to achieve this aim, the following tasks had to be solved:

1. To analyse and generally describe the methods in developed countries in water transporting to the site of fire and investigation are done, to define the advantages and disadvantages of the methods used in this process and to determine the optimal parameters of the dispersed water required for extinguishing small-scale fires.
2. To construct the mathematical models of the impulse hydraulic and pneumatic fire extinguishing device (relating to hydrodynamic processes and recoil).
3. To construct a mathematical model of the impulse hydraulic and pneumatic fire extinguishing device based on new parameters.
4. To carry out the experimental research of a physical model of the impulse hydraulic and pneumatic fire extinguishing device.
5. To perform the analysis of the calculation results obtained by using the developed mathematical models and the experimental research data to make the conclusions.

The research methods

Theoretical and experimental methods are used in the research. Theoretical studies are performed based on the main principles of hydrodynamics, theoretical mechanics and fire dynamics, with the use of analytical and numerical methods of research. The computer software package *Compaq Visual Fortran Professional v 6.3* and *Maple 9.01* are used in theoretical research into the dynamic and hydrodynamic processes.

Scientific novelty

In performing the research the following new results were obtained:

1. A mathematical model of the existing impulse hydraulic and pneumatic fire extinguishing device (IHPED), taking into account the interaction between the compressed air and the fluid, as well as the propagation of pressure waves in the fluid and the conditions of water transportation for fire extinguishing was constructed.
2. A mathematical model reflecting the processes taking place in the automatic IHPED, which takes into account periodic impulse-type discharge of a water jet into the fire, was constructed.
3. A mathematical model of the interaction between a user as a biomechanical system and IHPED, taking into account the effect of the recoil on the user was developed.
4. The required intensity of transporting the extinguishing materials (water) to the sites of small-scale fires was determined.

5. The optimal IHPED parameters were determined based on theoretical and experimental research.
6. The original model of the IHPED operation principle was developed (the innovation patent No 5436, registered in the Patent Register of the Republic of Lithuania, in July 25, 2007, was obtained).

Practical significance of the obtained results

The intensity of water supply for small-scale fire extinguishing was determined and, based on it, the acceptable IHPED parameters were found. The IHPED of the original design which may be manufactured and used by fire and rescue services, transport and other enterprises as well as by various institutions and organizations for extinguishing small-scale fires was developed. The mathematical models of the dynamic and hydrodynamic IHPED processes, which may also be used for analysing the parameters and hydrodynamic processes of similar devices, were constructed.

Defended statment

1. The interaction between the compressed air and the fluid, as well as the propagation of pressure waves in the fluid and the conditions of water transportation for fire extinguishing is evaluated by a constructed mathematical model of the existing impulse hydraulic and pneumatic fire extinguishing device (IHPED).
2. The periodic impulse-type discharge of a water jet into the fire is evaluated by a constructed mathematical model reflecting the processes taking place in the automatic IHPED.
3. The effect of the recoil on the user is evaluated by a constructed mathematical model of the interaction between a user as a biomechanical system and IHPED.
4. The extinguishing of small-scale fires is ensured by the determined required intensity $0,126 \text{ kg/m}^2\text{s}$ of transporting the extinguishing materials (water).
5. The formed mode of action of the automatic IHPED is original which ensures a more efficient small-scale fires extinguishing.

Approval of the research results

Four scientific papers were published on the dissertation topic in the reviewed journals (Suslavičius, Bogdevičius 2008; Bogdevičius, Suslavičius 2006b; Bogdevičius, Suslavičius 2005; Suslavičius, Bogdevičius 2003). One of them was published in the journal included in the list of the *ISI Web of Science*.

The data obtained in the research were presented at ten scientific conferences held in Lithuania and other countries (including 7 international and 3 Lithuanian conferences of young scientists). Two reports were published in Proceedings abstracted in the ISI data base and six – in the reviewed Proceedings of reports delivered at the following international conferences:

- *12th World Congress in Mechanism and Machine Science IFToMM 2007*, Besanson, France;
- *JFPS International Symposium on Fluid Power*, 2008 m. Toyma, Japan;

- An international conference „*Modern Building Materials, Structures and Techniques*“ 2007, Vilnius;
- An international conference „*Material Handling, Constructions and Logistics*“, 2006, Belgrade;
- An international conference „*Transport Means*“, 2005, 2006 m. Kaunas;
- An international conference „*Transbaltica – 03*“, 2003, Vilnius;
- A conference of young scientists „*Lithuania without Science – Lithuania without the Future*“, 2002–2005, Vilnius.

The structure of the dissertation

The work consists of the Introduction, four Sections, Conclusions, References, a List of publications on the topic of the dissertation, Summary in English and four Annexes. The dissertation has 114 pages (without the annexes), 61 figures and 11 tables.

1. A survey of the related works and currently used extinguishing fluid transportation device

In this section, various methods of transportation of fire extinguishing fluids to the site of the fire by using various devices, as well as their advantages and disadvantages, are described. The significance of atomizing a jet of water into drops for fire extinguishing and the use of mobile technical devices in extinguishing small-scale fires are shown. The latter is associated with the increase of fire extinguishing effectiveness, saving of the material resources and the decrease of a harmful environmental effect. The prospects of using the compressed air for this equipment are also outlined and the main principles and methods of achieving it are described. The required intensity of the extinguishing materials' supply to the sites of small-scale fires which should be provided by mobile extinguishing devices is determined. The currently used IHPEDs are analysed and some of their drawbacks are shown. The tests performed with these devices are described. It has been found that some tests have drawbacks because they show that the flow rate of a certain amount of the transported water through nozzles does not depend on the diameter of the opening, while the flow time depends on it.

The analysis performed in the dissertation shows that mathematical IHPED models describing all hydrodynamic processes involved in impulse-type water transportation based on the compressed air power and generation of the water fog, are still lacking. The effect produced by the considered equipment on its users has not been extensively studied either.

2. Theoretical research into dynamic and hydrodynamic processes taking place in device

In Section 2, the properties of water drops, their role in fire extinguishing and their optimal values are determined. The mathematical models of the IHPED are developed. The main IHPED parameters and the processes taking place inside these devices are determined by solving the equations describing the states of hydraulic and pneumatic systems and the motion equations of liquid and gases by using the characteristics method. The operational principle of the automatic IHPED of an original design is described and the interaction between a user as a biomechanical system and the device, developed in the course of operation, is considered.

In Subsection 2.1, the interaction between the drops of water and the environment is discussed and shown in the diagram presented in Fig 1S.

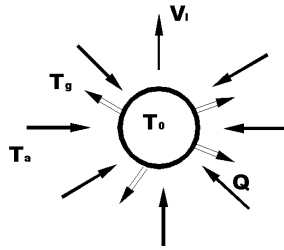


Fig. 1S. The diagram of the water drop interaction with the environment

The following dependences were found between heat absorption of water drops and their diameters, ensuring that the drops will not evaporate before they reach the surface being extinguished:

$$\frac{dQ}{dt} = c(\text{Re}, v) N^{5/3}, \quad (1)$$

$$D = \frac{v}{v_d} \sqrt{\frac{2,24 t_{ig} \lambda (T_a - T_g)}{\rho_v c_v (T_g - T_0)}}, \quad (2)$$

where $c = \frac{Nu(\text{Re}) \lambda (T_a - T_g) \pi^{2/3}}{6^{2/3} V^{2/3} \rho_v}$,

$\frac{dQ}{dt}$ – is a thermal change required for evaporating the drops of water,

$Nu(\text{Re})$ – is the Nusselt number, depending on Re ,

λ – is thermal conductivity of gas,

T_a – is the ambient temperature,

T_g – is the temperature of water drops' evaporation,

D – is the diameter of a water drop,

ρ_v – is water density,

N – is the number of water drops obtained from a certain amount of water,

V – is the volume of water, which, when atomized, gives the total number of water drops N ,

t_{isg} – is the time of water drop evaporation,

c_v – is the specific heat capacity of water required for heating the unit of mass by one degree,

T_0 – is the initial temperature of water,

ν_d – is kinematic gas viscosity,

v – is the velocity of water drops.

In Subsection 2.2, the developed mathematical model of the IHPED is presented, which is shown in Fig 2S.

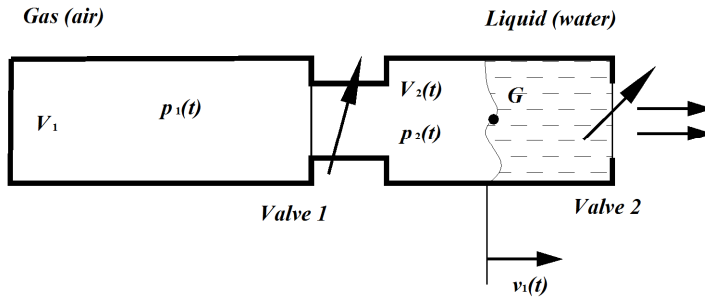


Fig. 2S. A mathematical model of the IHPED

The equation of gas pressure variation is written as follows:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\gamma R T_1}{V_1} (G_{1in}(p_1) - G_{12}(p_1, p_2)), \quad (3)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{\gamma R T_1}{V_2(t)} (G_{12}(p_1, p_2) - G_{23}(p_2)) - \frac{\gamma p_2}{V_2(t)} \frac{dV_2}{dt}, \quad (4)$$

where γ is the specific heat, R is gas constant, $G_{1in}(p_1)$ is the mass of the inflated air, G_{12} is the mass of the flowing air, G_{23} is the mass of the flowing air from IHPED, p_1, p_2 denote variable pressure depending on time, V_2 is the variable volume, V_1 is the space of the compressed chamber ($V_1 = const$), T_1 is temperature.

The equation for fluid flow homogeneity is as follows:

$$\frac{\partial}{\partial t}[S(x)\rho] + \frac{\partial}{\partial x}[S(x)\rho v] = F_1(x), \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[S(x)\rho v] + \frac{\partial}{\partial x}[S(x)(p + \rho v^2)] = F_2(p, v), \quad (6)$$

where S is cross-section area, x_G is the coordinate of surface G , p is the pressure of liquid, v is the velocity of liquid, ρ is water density, $F_1(x)$ and $F_2(p, v) = 0$.

For higher accuracy of modelling, the interaction between gases and liquid, a schematic view of this process is schematically shown in Fig 3S.

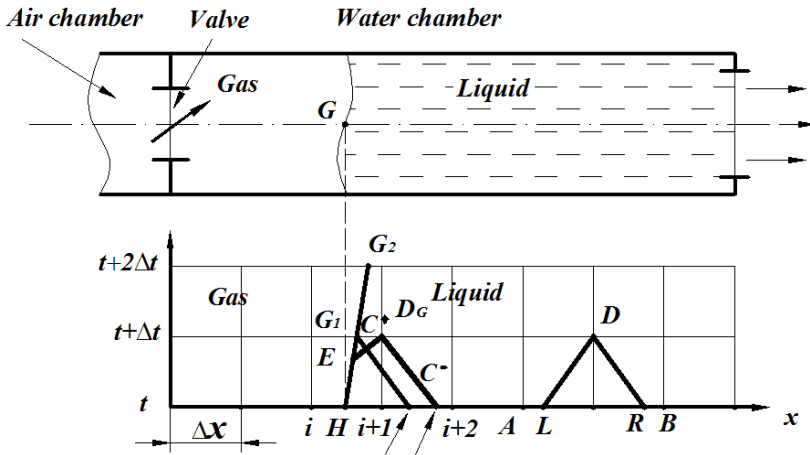


Fig. 3S. A schematic view of the interaction between gas and liquid

The fluid velocity and pressure at point G are obtained from the equations:

$$\begin{aligned} C^+ : \Phi_1 = & v_D - v_E + \frac{1}{2}(p_{DG} - p_E)[r_{1E} + r_{1D}] - \frac{\Delta t}{2}[r_{2E} + r_{2D}] - \\ & - \frac{\Delta t}{2}[r_{3E} + r_{3D}] = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} C^- : \Phi_2 = & v_D - v_R - \frac{1}{2}(p_{DG} - p_R)[r_{1R} + r_{1D}] + \frac{\Delta t}{2}[r_{2R} + r_{2D}] - \\ & - \frac{\Delta t}{2}[r_{3R} + r_{3D}] = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

where $r_1 = \frac{1}{\rho a}$, $r_2 = -a^2 \rho v \frac{dS}{dx} / S$, $r_3 = -a_x - \frac{\Pi \lambda (Re) v |v|}{8S}$, Π is the pipe perimeter,

a is the acceleration along the pipe.

In Subsection 2.3, a method of maintaining the required water flow intensity, based on periodical supply of water (in portions) through the pipes of particular diameters, is described. To ensure periodical discharge of water at the required frequency, the automatic IHPED control system was developed, which is schematically shown in Fig 4S.

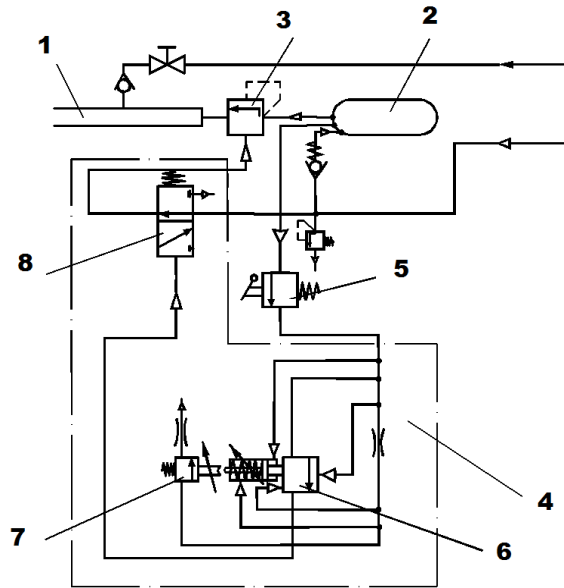


Fig 4S. A structural diagram of the automatic IHPED control system

1 is water chamber (pipe), 2 is the compressed air chamber, 3 is a quick-acting valve, 4 is the automatic control mechanism, 5 is a push button, 6 and 7 are controlled valves, 8 is the selector valve.

By selecting a water chamber 1 of the required parameters and regulating the operation of the mechanism 4 of the automatic control of the quick-acting valve by changing the pressure of the valve spring 6 and the position of the cam of the valve 7, it is possible to determine the optimal mode of small-scale fire extinguishing, to maintain the sufficient water supply intensity, to decrease the weight of the IHPED and the recoil due to the ejection of the smaller mass of water at higher frequency.

Based on general arrangement shown in Fig 4S, the dynamic model of the automatic control was constructed. The dynamic IHPED model is presented in Fig 5S, where the

acting masses m_i and their displacements q_i , as well as the chamber spaces V_i , and the developed pressures p_i are shown.

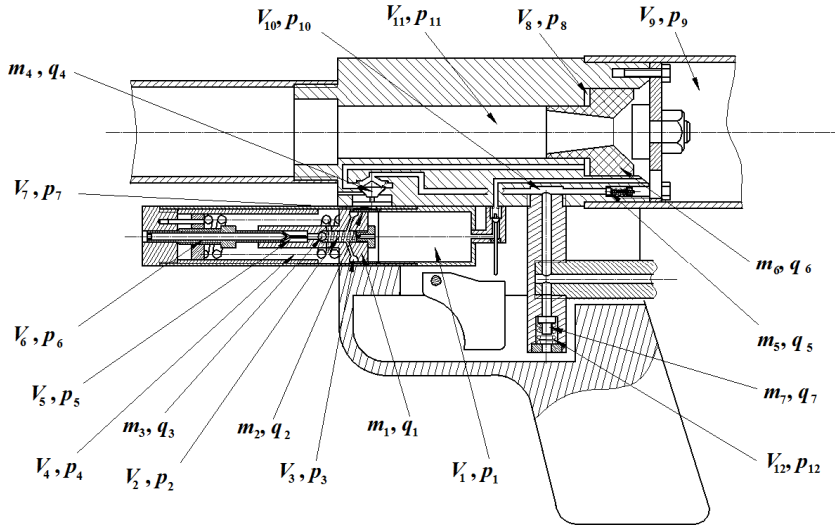


Fig. 5S. The dynamic model of the automatic IHPED

In modelling the dynamic and hydrodynamic processes of the automatic IHPED, the equation for the displacement of its masses and pressure variation in the working chambers were formulated as follows:

$$m_1 \ddot{q}_1 = p_1(S_{21} - S_{12}) - p_4(S_{17} - S_{111}) - k_1(q_1 + q_{10}) - F_{fr12} \operatorname{sgn}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) - F_{fr10} \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) - F_1(q_1), \quad (9)$$

where k_1 is the stiffness coefficient of the spring, acting on the mass m_1 , q_{10} is the pressure of the spring, acting on the mass m_1 , F_{fr12} is the friction force between the mass 1 and 2, F_{fr10} is the friction force between the mass 1 and the body of the automatic control mechanism, $F_1(q_1)$ denotes the component of the force, depending on the displacement of the mass 3 in the mass 1 and the characteristics of the spring, bearing upon it. In the same way, the equations for displacement of other masses in the chambers with varying pressure are formulated:

$$\dot{p}_1 = \frac{\gamma RT}{V_1} (G_{91} - G_{12} - G_{17}) - \frac{\gamma p_1}{V_1} \dot{V}_1, \quad (10)$$

where G_{ic} denotes the masses of the air flowing from chamber i to chamber c .

In a similar way, the equations for pressure variation in other chambers are formulated.

In Subsection 2.4, the forces acting in the course of IHPED operation are considered and their effect on the user of this device is determined. To assess the interaction between the

device and its user as a biomechanical system, a simplified model, shown in Fig 6S, was developed.

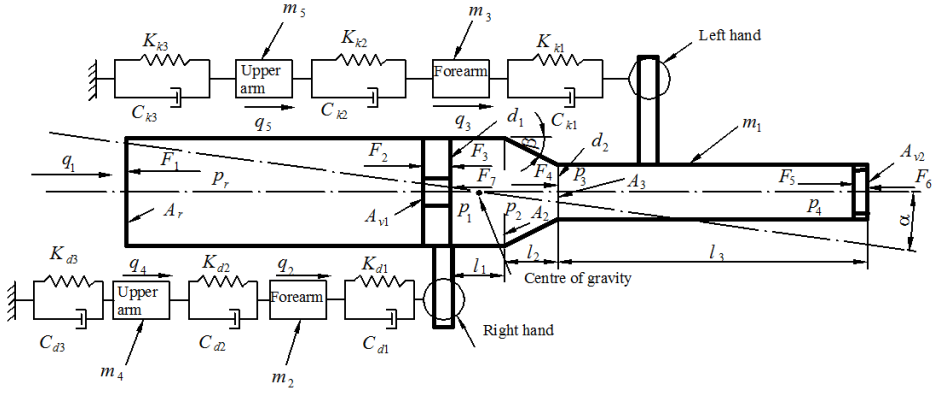


Fig. 6S. The recoil model of the IHPED

In the developed model, the interaction between the device and firefighter is simulated in terms of mechanical connections with viscous damping elements, corresponding to the right- and left-side hands, forearms and upper arms. The coefficients of the simulated mechanical springs of the right-side arm are K_{d1} , K_{d2} , K_{d3} , while the coefficients of viscous resistance are C_{d1} , C_{d2} , C_{d3} . For the left-side arm the coefficients are K_{k1} , K_{k2} , K_{k3} and C_{k1} , C_{k2} , C_{k3} , respectively. It is assumed that the coefficients of the respective elements of the right-side and left-side arms are of the same order. It is also assumed that, if the device is held properly, all F forces and resistance of the arm are acting along the longitudinal IHPED axis, even if the device is inclined horizontally at an angle α . The forces acting on the device cause it to make the displacement q_1 , while the displacements q_{2-5} of the respective parts of the arms may be also observed. The differential equations describing the movements of the arms and the IHPED are as follows:

$$m_1(t)\ddot{q}_1 = \sum F(t) - \dot{m}_1\dot{q}_1 - m_1(t)g \sin \alpha - K_{d1}(q_1 - q_2) - C_{d1}(\dot{q}_1 - \dot{q}_2) - K_{K1}(q_1 - q_3) - C_{K1}(\dot{q}_1 - \dot{q}_3), \quad (11)$$

where $\sum F(t)$ denotes all components of forces.

$$m_2\ddot{q}_2 = -K_{d1}(q_2 - q_1) - C_{d1}(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) - K_{d2}(q_2 - q_4) - C_{d2}(\dot{q}_2 - \dot{q}_4) + m_2g \sin \alpha, \quad (12)$$

$$m_3\ddot{q}_3 = -K_{k1}(q_3 - q_1) - C_{k1}(\dot{q}_3 - \dot{q}_1) - K_{k2}(q_3 - q_5) - C_{k2}(\dot{q}_3 - \dot{q}_5) + m_3g \sin \alpha, \quad (13)$$

$$m_4\ddot{q}_4 = -K_{d2}(q_4 - q_2) - C_{d2}(\dot{q}_4 - \dot{q}_2) - K_{d3}q_4 - C_{d3}\dot{q}_4 + m_4g \sin \alpha, \quad (14)$$

$$m_5 \ddot{q}_5 = -K_{k2}(q_5 - q_3) - C_{k2}(\dot{q}_5 - \dot{q}_3) - K_{k3}q_5 - C_{k3}\dot{q}_5 + m_5 g \sin \alpha. \quad (15)$$

The equations (11) – (15), describing the whole system, are presented in the matrix form:

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{F(t, p, v)\}, \quad (16)$$

where $[M]$ is the matrix of masses, $[C]$ is the matrix of damping, $[K]$ is the stiffness matrix.

The system of differential equations is combined with the equations of liquid and gas motion. During the transportation of the extinguishing fluid via the IHPED, the propagation of excited waves, causing the system's vibration, takes place. In this subsection, the natural frequencies of the user as a biomechanical system and the IHPED, which may be used for determining the effect produced on the user, are investigated.

3. The analysis of the results obtained in theoretical research

In Section 3, the analysis of the theoretical research results, relating to investigation of the dynamic and hydrodynamic processes inside the IHPED and automatic IHPED, as well as the interaction between these devices and the user as a biomechanical system, is presented. The numerical data of theoretical studies are also provided.

To obtain the numerical results, the following parameters of the actual and experimental water chambers (pipes) of the IHPED were used:

- the volume of the compressed air chamber $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$,
- the initial pressure of the air chamber 2,7 MPa,
- the length of the actual water chamber is 0,410 m and the diameter is 0,06 m,

The parameters of the experimental water chambers (pipes) are as follows:

- 20T – length – 0,4 m, the diameter – 0,02 m,
- 25T – length – 0,4 m, the diameter – 0,025 m,
- 25I – length – 0,5 m, the diameter – 0,025 m,
- 35T – length – 0,4 m, the diameter – 0,035 m,
- 35I – length – 0,5 m, the diameter – 0,035 m.

The calculations of the processes, taking place in the actual and experimental IHPED water chambers were made with the help of the equations derived by using the developed mathematical IHPED models and the computer software packages *Compaq Visual Fortran Professional v 6.3* and *Maple 9.01*. The time intervals chosen for calculations were $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}$, while the lengths of the water chamber L were divided into the sections of 2 mm. The obtained numerical results of fluid velocity and air pressure variation for various water chambers are presented in Figs 7S and 8S.

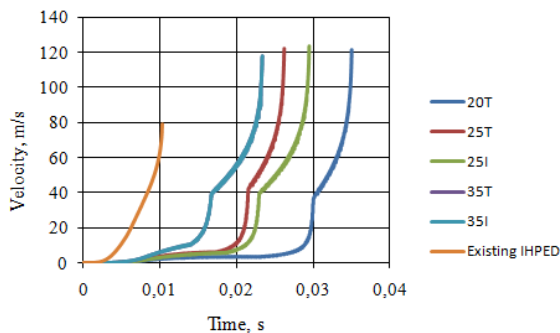


Fig. 7S. The chart demonstrating varying fluid velocity

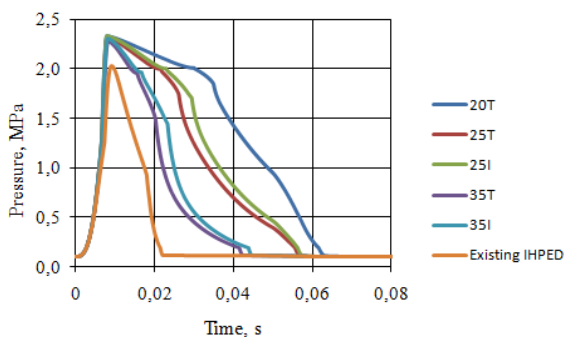


Fig. 8S. Air pressure variation depending on the type of the water chamber

The numerical results obtained demonstrate the variation of the velocity of water discharge, depending on the parameters of water chambers: for actual IHPED – 78,8 m/s, 20T – 122 m/s, 25T – 122 m/s, 25I – 123 m/s, 35T – 117 m/s, 35I – 118 m/s. The data show that the larger the diameter of the water chamber, the shorter the discharge time and the smaller the velocity of the water flow. The constructed mathematical model allows us to choose the chambers of various parameters, which could ensure water ejection at the required speed.

The numerical results obtained in the analysis of the automatic IHPED performance under the specified conditions and its parameters show that the frequency of water discharge was 0,68 Hz. By using the dynamic model of the automatic IHPED, we can choose the required characteristics (parameters).

The numerical results obtained in considering the recoils show that the recoil force of the actual IHPED reaches 7,76 kN, while for the IHPED with the pipe 20T it is 1,75 kN, with the pipe 25T – 2,74 kN and with the pipe 35T – 4,93 kN. These data show that using the appropriate pipe we can not only increase the rate of water transportation, but to decrease the recoil forces as well. In Fig 9S, the variation of the recoil force depending on a particular water chamber (pipe) is demonstrated for comparison.

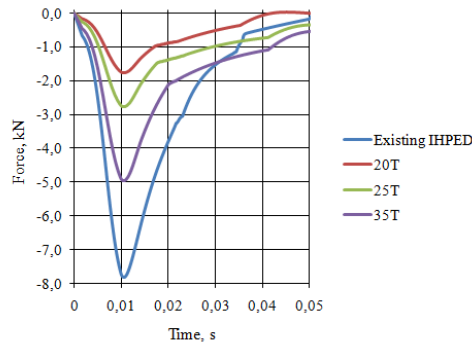


Fig. 9S. The variation of the recoil forces depending on the pipe used

The water is discharged during the IHPED operation, therefore, its mass is variable. The eigenvalues, natural frequencies and damping decrements of the considered biomechanical system (including a user and the IHPED), with various water amounts (masses) in the IHPED, are determined. The numerical results are obtained for the selected water chamber 35T, having different amounts of water. The obtained data show that natural frequencies of the operating IHPED with the varying mass due water discharge vary insignificantly, ranging from 1,809 Hz to 11,031 Hz. Taking into account a relatively short time of the users' operation with the IHPED (from a few to several minutes a day) the effect of vibration can hardly be considerable. However, it should be noted that natural frequencies of the system are similar to human natural frequencies. Therefore, special more detailed research is needed to solve this problem.

4. Experimental research into hydraulic and dynamic device processes

In Section 4, the data used in the experimental research and the results obtained are presented. The following devices and equipment were used in the experimental research: Faser IHPED IPG-1; experimental pipes of various diameters and lengths 20T, 25I, 25I, 35I, 35I; Digital camera TOSHIBA PDR-M70, capable of taking a photograph every 0,07 s; pressure sensors Danfoss MBS 4050 and the analog digital oscillograph Hameg HM 1507-3.

By taking the photographs of the ejected water jets over the distance of 5 m, the geometrical parameters of the jets were determined. They are presented in Figs 10S-14S.

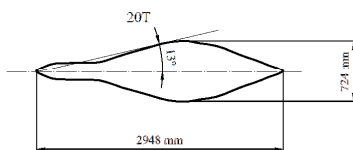


Fig. 10S. Overall jet view of the 20T pipe

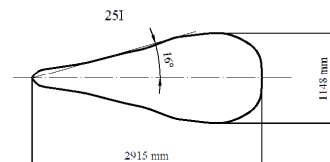


Fig. 11S. Overall jet view of the 25I pipe

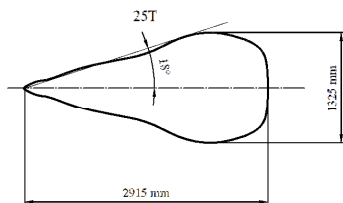


Fig. 12S. Overall jet view of the 25T pipe

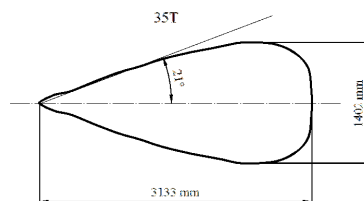


Fig. 13S. Overall jet view of the 35T pipe

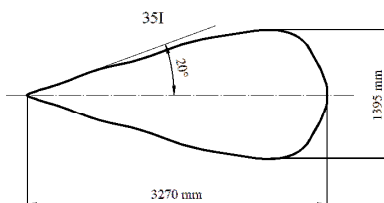


Fig. 14S. Overall jet view of the 35I pipe

Based on the data obtained, the efficiency of water supply, time intervals between water discharge impulses and applicability to fire extinguishing operations were determined for nozzles with various pipe types. The results obtained are presented in Table 1S.

Table 1S. Fire fighting performance in the case when water is discharged from different diameter pipes of the nozzle

Indicator	20T	25T	25I	35T	35I	IPG-1 factory made
V_{sv} , kg	0,094	0,147	0,196	0,288	0,385	1,000
P_{max} , m ²	0,411	1,378	1,035	1,543	1,525	7,065
K , kg/m ²	0,229	0,107	0,189	0,187	0,252	0,142
T_p , s	1,815	0,847	1,503	1,481	2,004	1,123 not feasible
N_{10} , m ²	1,028	3,445	2,588	3,858	3,813	not feasible required intensity
G_{10} , kg	0,518	1,736	1,304	1,944	1,922	
N_{30} , m ²	3,083	10,335	7,763	11,573	11,438	
G_{30} , kg	1,554	5,209	3,912	5,833	5,765	
N_{60} , m ²	6,165	20,670	15,525	23,145	22,875	
G_{60} , kg	3,107	10,418	7,825	11,665	11,529	
T_g , s	231,723	69,113	92,017	61,723	62,451	
N_{12} , m ²	23,810	23,810	23,810	23,810	23,810	

In the table, V_{sv} is the admissible amount of water in the pipe, P_{max} is the maximum cross-section area of a water spray, K is the admissible amount of water ejected in a single impulse from various pipes per surface area, T_p is the maximum interval between water discharge impulses, ensuring the required water supply intensity to the burning

surface ($I = 0,126 \text{ kg/m}^2\text{s}$), N_i is the admissible extinguishing area per specified extinguishing time period (10, 30 and 60 s), when the intensity of water supply to the extinguishing surface is maintained for at least 4 sec, T_g is the admissible time of extinguishing a particular surface area by using 12 litres of water, when the intensity of water supply to 1 m^2 of the extinguishing surface area is maintained for at least 4 sec, G_{60} is the amount of water used in the specified extinguishing time period, N_{12} is the area which can be extinguished with 12 litres of water.

The evaluation of the data obtained allowed us to rank various pipes used in a device according to their suitability for fire extinguishing in the descending order (with a more suitable pipe being the first) as follows: 1 – 35T, 2 – 35I, 3 – 25T, 4 – 25I, 5 – 20T. Using a device with the pipe 35T and given that water supply satisfies the specified conditions, it is possible to extinguish a larger area than those which can be extinguished using other pipes. For extinguishing the burning area of the same size, the theoretical extinguishing time with the use of the device pipe 35T is the shortest. It should be noted that currently produced IHPEDs cannot provide the required water supply intensity. Therefore, in practice, fire and rescue services should use two such devices at the same time for extinguishing a fire.

In investigating the variation of pressure in the pipes, it was found that the growth of pressure at the points of sensors' connection, with the compressed air chamber opened, lasts about 0,02 sec, while the drop of pressure takes about 0,3 sec. The whole process takes 0,32 sec. The maximum pressure, fixed by sensor 1 in the front chamber section, was 27 bar, while the pressure registered by sensor 2 in the rear of the chamber was equal to 23,2 bar. The differences in pressure between the sensors 1 and 2 increase with the increase in the diameter of the pipe by 13%, 19% and 30% in the pipes 20T, 25T and 35T, respectively. The variation of pressure in the pipe 35T is demonstrated in Fig 15S.

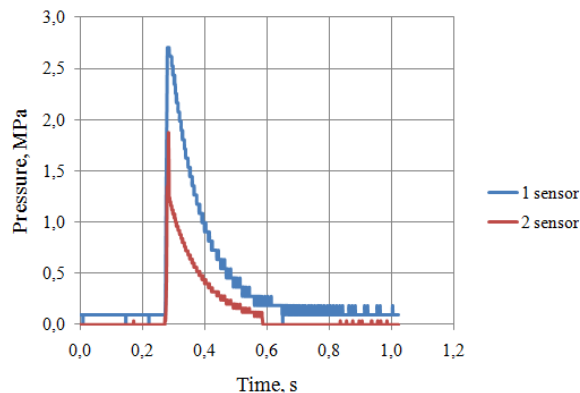


Fig. 15S. The variation of pressure in the pipe 35T during water discharge

The experimentally obtained pressures approach those calculated by the equations of the mathematical IHPED model. However, their direct comparison is restricted because the

supply of the compressed air from the air reservoir to the air chamber through the gas pressure regulator may differ by about 10 % in a factory-made IHPED.

General conclusions

The theoretical and experimental study of the device operation and processes taking place in the existing IHPEDs and the created automatic IHPED, allowed the author to draw the following conclusions, relating to theoretical and practical aspects of the investigated phenomena:

1. The relationship between the thermal capacity of water used in fire extinguishing and the number of droplets obtained in atomizing it is determined. Heat absorption of a particular amount of water depends on the number of droplets obtained from it and speed of their movement. The derived dependence of the diameter and speed of the droplets allows to determine their value needed for extinguishing small-scale fires. The diameter of the droplets has to be not smaller than $1,8 \mu\text{m}$ when the speed is 120 m/sec aiming that the droplets reach the surface area to be extinguished.

2. A mathematical model of hydrodynamic IHPED processes, taking into account the interaction between the compressed air and the liquid (water) is developed. The created model allows for considering the effect of the compressed air pressure, the amount of the water used and geometrical IHPED parameters on the process of water transportation. It has been found that for the 1,5 litre compressed air chamber with the internal pressure reaching 2,7 MPa, as well as the quick-acting valve with the activation time of 10 ms and the pipe of 0,06 m in diameter, the speed of the ejected water jet up to 80 m/sec can be achieved.

3. A mathematical model of the dynamic and hydraulic processes taking place inside the automatic IHPED, which takes into account the operation of the automatic control mechanism, is developed. The model created allows for determining the influence of the parameters of the automatic control mechanism's components on the frequency of impulse-type water ejection, i.e. on the intensity of water supply. It has been found that given the rational parameters of the automatic IHPED the frequency of water ejection can reach 0,68 Hz.

4. A mathematical model describing the interaction between the IHPED and the user as a biomechanical system is developed. The created model allows for evaluating the variation of forces, acting on a user during the ejection of water. It has been found that given the pressure of 2,7 MPa in the compressed air chamber and the volume of the ejected water of 1 kg the maximum recoil force can reach 7,76 kN. Using the described more effective chamber, it is possible to increase the rate of water transportation by the IHPED to the fire site by 33 % and to decrease the force, acting on the user, by 37 %.

5. The original automatic IHPED (the Lithuanian patent 5436 B) is created, based on periodical impulse type supply of water by determined frequency. The created automatic IHPED can be used by fire and rescue services for extinguishing small-scale fires. This could help to decrease the extinguishing time, to save the material resources and finances and to decrease the damage due to the harmful effect of the spilled water.

6. The special software, using the software package *Compaq Visual Fortran Professional v 6.3* is developed for simulating the dynamic and hydrodynamic processes taking place inside the IHPED. The constructed models allow for using the IHPED in various means of transport, including trains, ships, flying apparatuses, military and other specialized vehicles.

Priedai¹

A priedas. Automatinio impulsinio hidraulinio ir pneumatinio gesinimo įrenginio konstrukcinio modelio schema ir sudėtinės jo dalys

B priedas. Gaisro gesinimo švirkštų čiurkšlių koordinačių parametrai

C priedas. Bendraautorijų sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje

D priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Vladimiras SUSLAVIČIUS

INVESTIGATION OF THE MOBILE IMPULSE HYDRAULIC AND PNEUMATIC FIRE
FIGHTING DEVICE FOR EXTINGUISHING SMALL-SCALE FIRES

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Transport Engineering (03T)

Vladimiras SUSLAVIČIUS

MOBILAUS IMPULSINIO HIDRAULINIO IR PNEUMATINIO GAISRO ŽIDINIŲ
GESINIMO ĮRENGINIO TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
transporto inžinerija (03T)

2011 07 27. 10,75 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius

A priedas. Automatinio impulsinio hidraulinio ir pneumatinio gesinimo įrenginio konstrukcinio modelio schema ir sudėtinės jo dalys

B priedas. Gaisro gesinimo švirkštų čiurkšlių koordinacių parametrai

C priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje

D priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos