

# КОМУНАЛЬНЕ ГОСПОДАРСТВО МІСТ MUNICIPAL ECONOMY OF CITIES

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК  
СЕРІЯ: ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА АРХІТЕКТУРА

**ТОМ 4 ВИПУСК 178'2023**

*Ідентифікатор медіа у Реєстрі суб'єктів медіа R30-01140 від 10.08.2023 р.  
Наукове фахове видання категорія «Б» за спеціальностями 121, 122, 123, 124, 125, 126, 131, 132, 133, 191, 192, 193, 194, 261, 263, 273, 274, 275 (наказ МОН України № 1301 від 15.10.19), 141, 183 (наказ МОН України № 1643 від 28.12.19)*

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

БАБАЄВ В. М.	<b>відповідальний редактор,</b> д.держ.упр., ректор ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
СУХОНОС М. К.	<b>відповідальний секретар,</b> д.т.н., проректор з наукової роботи, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ДЯДІН Д.В.	к.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
КОГАЛОВСЬКИЙ В.	к.т.н., Інженерний коледж «Самі Шамун», Ізраїль
ПЛЮГІН В.Є.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ЧУМАЧЕНКО І.В.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ШЕВЧЕНКО Р.І.	д.т.н., НУЦЗ України
ШМУКЛЕР В.С.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ШПАЧУК В.П.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова

## EDITORIAL BOARD

BAVAYEV V.	<b>Editor-in-Chief,</b> Dr. Sc., Rector of the O.M. Beketov NUUE
SUKHONOS M.	<b>Executive Managing Editor,</b> Dr. Sc., Vice-rector of the O.M. Beketov NUUE
DIADIN D.	PhD, O.M. Beketov NUUE
KAGALOVSKY V.	PhD, Engineering College "Sami Shamun", Israel
PLUGIN V	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
CHUMACHENKO I.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
SHEVCHENKO R.	Dr.Sc., NUCDU
SHMUKLER V.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
SHPACHUK V.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE

## КООРДИНАЦІЙНА РАДА

<b>ШУТЕНКО Л. М.</b>	<b>голова координаційної ради,</b> д.т.н., почесний ректор ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ГОВОРОВ П.П.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ДАЛЕКА В.Х.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ДРЕВАЛЬ І.В.	д.архт., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ДУШКІН С.С.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
КОНДРАЩЕНКО О.В.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
МАЛЯРЕНКО В.А.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
МИХАЙЛИШИН О.Л.	д.архт., НУВГП
ОСИЧЕНКО Г.О.	д.архт., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ТОВБИЧ В.В.	д.архт., КНУБА
ФЕЙРУША С.Х.	к.т.н., Університет Салахаддін – Ербіль, Ірак
ХАРЧЕНКО В.Ф.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ЧЕЧЕЛЬНИЦЬКИЙ С.Г.	д.архт., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ЧУДНОВСЬКИЙ А.	к.т.н., Гамбурзький університет, Германія
ЮРКЕВИЧ І.	к.т.н., Астонський університет, Великобританія
ЯНКЕЛЕВИЧ М.	к.т.н., Парсонс, США

## COORDINATION COUNCIL

<b>SHUTENKO L.</b>	<b>Chairman of the Coordination Council,</b> Dr.Sc., Honorary Rector of the O.M. Beketov NUUE
GOVOROV P.	Dr. Sc., O.M. Beketov NUUE
DALEKA V.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
DREVAL I.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
DUSHKIN S.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
KONDRASHENKO O.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
MALYARENKO V.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
MYHAYLISHYN O.	Dr.Sc., NUWEE
OSYCHENKO G.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
TOVBICH V.	Dr.Sc., KNUCA
FEIRUSHA S.	PhD, Salahaddin University – Erbil, Iraq
HARCHENKO V.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
CHECHELNIITSKY S.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
CHUDNOVSKIY A.	Ph.D., University of Hamburg, Germany
YURKEVICH I.	Ph.D., Aston University, United Kingdom
YANKELEVICH M.	PhD, PARSONS, USA

### Адреса редакції / Editorial office address:

61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17 / 17, Marshala Bazhanova Street, Kharkiv, 61002

Тел./tel.: +38 (057) 707-33-21, e-mail: khg@kname.edu.ua

**ISSN (print) 2522 – 1809**

**ISSN (online) 2522 – 1817**

*Затверджений до друку Науково-технічною Радою Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова (протокол № 1 від 31 серпня 2023 року)*

---

## ЗМІСТ

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Худяков І.О., Сухонос М.К.* Адаптивна модель підтримки прийняття рішень при управлінні програмами та проектами з реконструкції інженерної інфраструктури .... 2
- Горбаченко С.А., Чепурна О.Є., Разінкін Н.С.* Вплив низьковуглецевого розвитку на комунальні господарства міст (системний підхід) ..... 10

### МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

- Скрипинець А.В., Саєнко Н.В., Блажко В.В., Саєнко Л.В.* Оцінка ефективності: епоксиретанові демпфуючі вставки в системах віброзахисту ..... 17

### ВИРОБНИЦТВО ТА ТЕХНОЛОГІЇ

- Телюра Н.О., Плясуля С.В., Крупицька Д.А., Вірченко В.І.* Системи підтримки прийняття рішень в проектуванні інноваційних технологій захисту довкілля ..... 27
- Решетченко А.І., Юрченко В.О., Куракова Н.О., Воробйов О.М.* Контейнерне зберігання як елемент підвищення екологічної безпеки та інструмент державної політики поводження із техногенно підсиленими джерелами іонізуючого випромінювання ..... 33

### АРХІТЕКТУРА ТА БУДІВНИЦТВО

- Древаль І.В., Рубан Л.І., Осиченко Г.О.* Сучасні наукові підходи як інструмент вирішення екологічних проблем формування міських просторів ..... 38
- Осиченко Г.О., Тишкевич О.П.* Етапи формування мережі закладів загальної середньої освіти у сільській місцевості України ..... 45
- Вотінов М.А., Смірнова О.В.* Сучасне архітектурне формотворення та 3-D друк житлових об'єктів ..... 55
- Шумаков І.В., Табачников С.В., Наливайко Т.А., Дорожко Є.В., Наливайко Т.Т.* Інноваційні методи планування і реконструкції будівель історичної спадщини з використанням 3D сканера ..... 65
- Діденко К.В., Діденко Д.В.* Історія формування та розвитку українського наукограду Пятихатки. Архітектурно-планувальні та функціональні особливості .... 72
- Чуб О.М., Крейзер І.І.* Реконструкція університетського стадіону "Уніфехт" під час військової агресії в місті Харкові ..... 79
- Семко О.В., Пінчук Н.М., Усенко Д.В.* Оцінка надійності кам'яних конструкцій . 87
- Солодовник Ю.Ю., Рюмін В.В.* Аналіз поведінки т-подібного компоненту фланцевого вузлового з'єднання балки з колоною на підставі чисельної моделі та норм EN – 1993-1-8 ..... 92
- Бутенко А.А., Мозговий А.О.* Аналіз вітчизняних та світових норм щодо критеріїв граничних станів фундаментів сталевих силосів ..... 102
- Куницький М.О.* Геопросторовий розподіл міської інфраструктури для практичного застосування теплових насосів ..... 113
- Алейнікова А.І., Гулевський П.Ю., Вороненко І.В.* Організаційно-технологічні рішення ремонту та відновлення каналізаційних тунелів в місцях перебування з оглядовими шахтами ..... 118
- Пілічева М.О., Кондращенко О.В., Штерндок Е.С.* Сучасні методи моніторингу використання земель міського середовища ..... 125

<i>Пілічева М.О., Метешкін К.О., Кондращенко О.В.</i> Факторний аналіз як метод дослідження використання земель міст .....	130
<i>Нестеренко С.Г., Фролов В.О., Харів В.В., Фролов О.В., Нелін Є.О.</i> Інтегральний метод визначення рівня екологічного використання земель міського середовища .....	136
<i>Воронков О.О., Кобзан С.М., Поморцева О.Є.</i> Геоінформаційна модель транспортної мережі .....	141
<i>Мамонов К.А., Ковальчук В.С., Троян В.І.</i> Особливості аерофотозйомки при проектуванні капремонту та реконструкції автомобільних доріг .....	147
<i>Нелін Є.О., Касьянов В.В., Харів В.В.</i> Просторове забезпечення територій за допомогою сучасних БПЛА .....	152
<i>Горб О.І., Мамонов К.А., Наливайко Т.А., Поморцева О.Є.</i> Особливості вивчення геоінформаційних систем при підготовці здобувачів спеціальності «геодезія та землеустрій» .....	157
<i>Лю Чан, Величко В.А., Коваленко Л.Б.</i> Формування освітніх компонентів із спеціальності геодезія та землеустрій на бакалаврському рівні .....	167
<i>Пальченко О.Л.</i> Моніторинг – як один з основних факторів безпеки хвостосховищ .....	172

### **ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА**

<i>Щербак О.С., Нешпор О.В., Дерев'янка О.А., Єременко С.А., Шевченко Р.І.</i> Алгоритм застосування методики виявлення осередкових ознак надзвичайної ситуації внаслідок пожежі на об'єктах критичної інфраструктури .....	179
<i>Абрамов Ю.О., Кривцова В.І., Михайлюк А.О.</i> Новий підхід до підвищення рівня пожежної безпеки водневої системи .....	188
<i>Абрамов Ю.О., Коломієць В.С., Собина В.О.</i> Моделі гасіння пожежі при горінні горючої рідини .....	194
<i>Землянський О.М., Юрга Т.В., Трошкін С.Є.</i> Створення портативного піногенератора із проведенням практичних досліджень .....	199
<i>Кравцов М.М.</i> Пожежна небезпека гібридних та електричних автомобілів .....	206
<i>Олейник О.С., Отрош Ю.А., Рашкевич Н.В., Шаповал С.В.</i> Моделювання можливої зони задимлюваності в зруйнованому укритті .....	210
<i>Майборода Р.І., Отрош Ю.А., Рашкевич Н.В., Мележик Р.С.</i> Дослідження евакуації маломобільних груп населення з житлових висотних будинків при пожежі ..	219
<i>Рашкевич Н.В.</i> Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій на територіях України, які зазнали ракетно-артилерійських уражень .....	232
<i>Цопа В.А., Чеберячко С.І., Дерюгін О.В., Сушко Н.С., Шароватова О.П.</i> Аналіз причинно-наслідкових зав'язків у хронології подій катастрофи на Байконурі .....	252
<i>Мороз М.О., Михайлова Є.О., Гармаш Б.К., Барбашин В.В.</i> Існуючі загрози у контексті цивільної безпеки та заходи щодо зменшення їх впливів .....	262
<i>Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Шевченко Р.І., Шевченко О.С.</i> Методи дослідження загроз і ризиків .....	269
<i>Корчагін П.О., Єременко С.А., Хмирова А.О., Хиров І.М., Шевченко О.С., Шевченко Р.І.</i> Проблематика процесу ліквідації надзвичайних ситуацій регіонального рівня в умовах воєнного впливу на систему підготовки фахівців з експлуатації аварійно-рятувальної техніки .....	280

---

<i>Крайнюк О.В., Буц Ю.В., Діденко Н.В., Барбашин В.В.</i> Метрологічне забезпечення атестації робочого місця за умовами праці .....	286
--	-----

**ТРАНСПОРТ**

<i>Тіщенко В.С., Логвіненко О.А., Одегов М.М.</i> Визначення частот власних коливань елементів механічної системи моторвагонного рухомого складу .....	293
--	-----

<i>Галкін А.С.</i> Сучасний метод системного бібліометричного огляду цифровізації міських вантажних перевезень для стійкого розвитку транспорту .....	299
---	-----

<i>Давідич Ю.О., Галкін А.С., Понкратов Д.П., Куш Є.І., Самчук Г.О.</i> Визначення логістичних параметрів е-карго байків для сталої доставки поштовних вантажів в містах .....	304
--	-----

---

## CONTENTS

### **INFORMATION TECHNOLOGY**

- Khudiakov I., Sukhonos M.* An adaptive decision-making support model in the management of engineering infrastructure reconstruction programs and projects ..... 2
- Horbachenko S., Chepurina O., Razinkin N.* The impact of low-carbon development on municipal utilities (systemic approach) ..... 10

### **MECHANICAL ENGINEERING**

- Skripinets A., Saienko N., Blazhko V., Saienko L.* Efficiency evaluation: epoxyurethane damping inserts in vibration protection systems ..... 17

### **PRODUCTION AND TECHNOLOGY**

- Teliura N., Plyasulya S., Krupyt'ska D., Virchenko V.* Complex support systems for the acceptance of innovative decisions in environmental protection ..... 27
- Reshetchenko A., Iurchenko V., Kurakova N., Vorobiov O.* Container storage as an element of enhancement of environmental safety and a state policy tool for dealing with technologically enhanced sources of ionizing radiation ..... 33

### **THE DESIGN AND ARCHITECTURE**

- Dreval I., Ruban L., Osychenko G.* Modern scientific approaches as a tool for solving environmental problems of the formation of urban spaces ..... 38
- Osychenko G., Tyshkevych O.* Stages of formation of a network of general secondary education institutions in a rural location of Ukraine ..... 45
- Votinov M., Smirnova O.* Modern architectural formation and 3d printing of residential buildings ..... 55
- Shumanov I., Tabachnikov S., Nalyvaiko T., Dorozhko E., Nalyvayko T.* Innovative methods of planning and reconstruction of historical heritage buildings using a 3D scanner . 65
- Didenko K., Didenko D.* History of formation and development the Ukrainian science city of Pyat'khatki. The architectural, planning and functional specifics ..... 72
- Chub O., Kreizer I.* Reconstruction of the "Unifekt" university stadium during the military aggression in the city of Kharkiv ..... 79
- Semko O., Pinchuk N., Usenko D.* Reliability assessment of stone structures ..... 87
- Solodovnyk Y., Riumin V.* T-stub component behavior of the beam to column bolted flange connection based on a numerical analysis and EN 1993-1-8 design codes ..... 92
- Butenko A., Mozgovuy A.* Analysis of domestic and world standards regarding the criteria of the boundary states for the steel silos foundations ..... 102
- Kunytskyi M.* Geospatial distribution of city infrastructure for the practical application of heat pumps ..... 113
- Aleynikova A., Hulievskiy P., Voronenko I.* Organizational and technological solutions for the repair and restoration of sewage tunnels in the places adjacent to exploration mines .. 118
- Pilicheva M., Kondrashchenko O., Shterndok E.* Modern methods of urban environment land use monitoring ..... 125
- Pilicheva M., Meteshkin K., Kondrashchenko O.* Factor analysis as a method of urban land use research ..... 130
- Nesterenko S., Frolov V., Khariv V., Frolov O., Nelin E.* Integral method of determining the level of environmental land use in the urban environment ..... 136
- Voronkov O., Kobzan S., Pomortseva O.* Geoinformation model of the transport network ..... 141

<i>Mamonov K., Kovalchuk V., Troian V.</i> The features of aerial photography for road repair or reconstruction .....	147
<i>Nelin E., Kasyanov V., Khariv V.</i> Spatial provision of territories with modern UAVS ...	152
<i>Gorb O., Mamonov K., Nalivayko T., Pomortseva O.</i> Features of the study of geoinformation systems in the training of students of the specialty «geodesy and land surveying» .....	157
<i>Liu Chang, Velychko V., Kovalenko L.</i> Formation of educational components in the specialty of geodesy and land surveying at the bachelor level .....	167
<i>Palchenko O.</i> Monitoring is one of the main safety factors of tailings storage facilities ..	172

### **CIVIL SECURITY**

<i>Shcherbak O., Neshpor O., Derevyanko O., Yeremenko S., Shevchenko R.</i> Algorithm for application of methods for detecting central signs of an emergency situation due to fire at critical infrastructure facilities .....	179
<i>Abramov Y., Kryvtsova V., Mikhailyuk A.</i> New pidhid up to the movement of fire safety water systems .....	188
<i>Abramov Y., Kolomiiets V., Sobyna V.</i> Models of fire extinguishing when flammable liquid combustion .....	194
<i>Zemlianskyi O., Yurha T., Troshkin S.</i> Creation of a portable foam generator with practical research conducted .....	199
<i>Kravtsov M.</i> Fire hazard of hybrid and electric and vehicles .....	206
<i>Oleynyk O., Otrosh Yu., Rashkevich N., . Shapoval S.</i> Simulation of a possible smoking zone in a destroyed shelter .....	210
<i>Maiboroda R., Otrosh Yu., Rashkevich N., Melezhyk R.</i> Assessment of the fire resistance of buildings from fireproof reinforced concrete building structures .....	219
<i>Rashkevich N.</i> Analysis of the current state of warning of emergency situations in the territories of Ukraine which were suffered by rocket and artillery impacts .....	232
<i>Tsopa V., Cheberyachko S., Deryugin O., Sushko N., Sharovatova O.</i> Analysis of cause-effect relations in the chronology of the events of the Baikonur disaster .....	252
<i>Moroz M., Mykhailova E., Harmash B., Barbachyn V.</i> Existing threats in the civil security context and measures to reduce their impacts.....	262
<i>Azarenko O., Honcharenko Yu., Divizinyuk M., Shevchenko R., Shevchenko O.</i> Threats and risks research methods .....	269
<i>Korchagin P., Eremenko S., Khmyrova A., Khmyrov I., Shevchenko O., Shevchenko R.</i> Problems of the process of liquidation of extraordinary situations at the regional level under the conditions of military influence on the system of training specialists in the operation of emergency and rescue equipment .....	280
<i>Krainiuk O., Buts Yu., Didenko N., Barbachyn V.</i> Metrological provision of workplace certification according to working conditions .....	286

### **TRANSPORT**

<i>Tishchenko V., Lohvinenko O., Odegov M.</i> Determination of the frequency of natural oscillations of the elements of the mechanical system of the motor carriage rolling stock ....	293
<i>Galkin A.</i> The advanced method of systematic bibliometric review of the digitalization of urban truck transportation for the sustainable development of transport .....	299
<i>Davidich Yu., Galkin A., Ponkratov D., Kush Y., Samchuk G.</i> Determination of logistics parameters of e-cargo bikes for sustainable delivery of postal cargo in cities .....	304

Ю.О. Абрамов, В.С. Коломієць, В.О. Собина

Національний університет цивільного захисту України, Україна

## МОДЕЛІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ПРИ ГОРІННІ ГОРЮЧОЇ РІДИНИ

*Процес гасіння горючої рідини, що горить, описується передаточною функцією в класі ірраціональних функцій комплексного аргументу. Спрощення структури передаточної функції здійснюється переходом до дрібно-раціональних функцій за допомогою мінімаксної апроксимації із використанням алгоритму Ремеза. Із використанням методу невизначених коефіцієнтів побудована передаточна функція у вигляді суперпозиції передаточних функцій аперіодичних ланок.*

**Ключові слова:** горюча рідина, гасіння пожежі, розпилена вода, передаточна функція.

### Постановка проблеми

Системи автоматичного пожежогасіння мають стійку тенденцію до їх все більшого використання. Це обумовлено тим що:

- системи автоматичного пожежогасіння забезпечують виявлення небезпечних чинників пожежі на відміну від оперативних підрозділів ДСНС;

- в системах автоматичного пожежогасіння технічні засоби, що забезпечують доставку вогнегасних речовин до пожежі, апріорі розташовуються на цьому об'єкті;

- при функціонуванні автоматичних систем пожежогасіння повністю виключається дія суб'єктивного фактору.

Подальший розвиток таких систем пожежогасіння пов'язаний із поглибленим вивченням і відповідною формалізацією процесів, які мають місце в їх об'єкті управління – пожежі. Розгляд пожежі як об'єкта управління автоматичної системи пожежогасіння потребує нових підходів до математичного опису таких об'єктів. Одним із таких рішень є розповсюдження методів теорії автоматичного управління для побудови математичних моделей систем автоматичного пожежогасіння та їх елементів. До числа проблем при такому підході слід віднести можливість появи ірраціонального фактору в структурі математичної моделі пожежі, що суттєво обмежує її використання.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

При розгляді гасіння пожеж розпиленою водою, як правило, в якості математичного опису використовуються статичні моделі. Такі моделі носять емпіричний або ілюстративний характер і в своїй більшості представляють функціональну залежність часу гасіння пожежі від параметрів пожежі та вогнегасної речовини [1]. В ряді випадків

такий тип математичних моделей визначає залежність критичного значення інтенсивності подачі розпиленої води до осередку горіння від його параметрів [2]. Прикладом динамічних математичних моделей пожеж при їх гасінні, зокрема, розпиленою водою є моделі, наведені в [3]. Ці математичні моделі представляють собою звичайні диференційні рівняння, що витікають із рівняння теплового балансу. Математичну базу для формалізації процесів гасіння пожеж складають рівняння тепло- і масопереносу [4], які є диференційними рівняннями в часткових похідних. Розгляд пожежі при її гасінні як об'єкта із розподіленими змінними обумовлює труднощі при вирішенні диференційних рівнянь [5], які можуть бути послаблені за рахунок спрощення математичного опису [6] або за рахунок використання інтегральних перетворень. Внаслідок того, що пожежа при її гасінні є об'єктом управління системи автоматичного управління, її математичний опис доцільно здійснювати із використанням інтегрального перетворення Лапласа [7]. Але в цьому випадку моделі пожежі представляють ірраціональні функції комплексної змінної, що звужує область їх використання.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення досліджень спрямованих на позбавлення ірраціональності в математичних моделях пожеж при їх гасінні розпиленою водою.

### Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є побудова математичних моделей пожеж при горінні горючої рідини на етапі їх гасіння розпиленою водою, які належать класу дрібно-раціональних функцій комплексної змінної.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- здійснити мінімаксну апроксимацію на основі алгоритму Ремеза передаточної функції пожежі при її гасінні розпиленою водою;

- із використанням метода невизначених коефіцієнтів здійснити перехід від передаточних функцій пожежі при її гасіння розпиленою водою, представлених у вигляді дрібно-раціональних функцій комплексного аргументу, до суперпозиції передаточних функцій елементарних динамічних ланок;

- одержати оцінки похибок розбіжності між ірраціональними математичними моделями пожежі при її гасінні розпиленою водою та апроксимованими математичними моделями.

### Виклад основного матеріалу

Процес гасіння пожежі розпиленою водою, яка має місце при горінні горючої рідини, згідно [6] описується диференціальним рівнянням у безрозмірній формі

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \quad (1)$$

із початковими та граничними умовами

$$\theta(x, 0) = 0; \quad \frac{\partial \theta(0, t)}{\partial x} = -\frac{raKI}{V\lambda(T_k - T_0)}, \quad (2)$$

де  $\theta = (T_k - T)(T_k - T_0)$ ;  $T$  – температура горючої рідини;  $T_k, T_0$  – температура кипіння горючої рідини та температура навколишнього середовища відповідно;  $r$  – теплота випаровування води;  $a, \lambda$  – коефіцієнт температуропровідності та теплопровідності горючої рідини відповідно;  $K$  – коефіцієнт використання розпиленої води;  $V$  – лінійна швидкість розповсюдження полум'я;  $I$  – інтенсивність подачі розпиленої води;  $t = V^2 a^{-1} t_p$  – безрозмірний час;  $t_p$  – розмірний час;  $x = Va^{-1} z$  – безрозмірний координата,  $z$  – розмірна координата вздовж нормалі до поверхні горючої рідини.

Якщо розглядати гасіння горючої рідини розпиленою водою як функціонування об'єкта управління в системі пожежогасіння, то такому динамічному елементу буде відповідати передаточна функція [8].

$$W(p) = \theta(p) I^{-1}(p) = \frac{raK}{v\lambda(T_k - T_0)} [0,5 + (p + 0,25)^{0,5}]^{-1}, \quad (3)$$

де  $\theta(p), I(p)$  – зображення по Лапласу від безрозмірної температури  $\theta(0, t)$  та від інтенсивності подачі розпиленої води  $I(t)$  відповідно;  $p$  – комплексна змінна.

Функція (3) є ірраціональною функцією аргументу  $p$ , що обумовлює суттєві труднощі при її використанні в межах класичної теорії автоматичного управління. Одним із варіантів виходу із цієї ситуації є здійснення апроксимації ірраціональної функції  $W(p)$  дрібно-раціональною функцією.

Апроксимації підлягає функція  $q(p)$ , яка має вигляд

$$q(p) = [0,5 + (p + 0,25)^{0,5}]^{-1}. \quad (4)$$

Апроксимацією цієї функції є функція  $q(m, n)$ , яка описується виразом

$$q(m, n) = \left[ \sum_{i=0}^m a_i p^i \right] \left[ \sum_{j=0}^n b_j p^j \right]^{-1}; \quad m < n, \quad (5)$$

де  $a_i, b_j$  – коефіцієнти апроксимації, що підлягають визначенню.

Максимальне значення порядку  $n$  полінома Гурвіца обирається за умови забезпечення стійкості. У відповідності із критерієм Гурвіца необхідно, щоб виконувались умови

$$b_j > 0, \quad j = \overline{0, n}. \quad (6)$$

В табл.1 наведені значення коефіцієнтів  $a_i$  та  $b_j$ , які одержані для трьох функцій  $q(m, n)$  у відповідності із методом мінімаксної апроксимації, де реалізований алгоритм Ремеза.

Таблиця 1  
Значення параметрів апроксимації

i, j	q(1,2)		q(2,3)		q(3,4)	
	$a_i$	$b_j$	$a_i$	$b_j$	$a_i$	$b_j$
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1	0,42	1,27	1,40	2,48	2,11	3,16
2		0,054	0,13	0,68	0,74	2,11
3				0,01	0,032	0,21
4						0,002

На рис.1 наведені залежності для похибок розбіжності  $\delta(m, n)$  між функцією  $q(p)$  та функціями  $q(m, n)$  із параметрами відповідно табл. 1.

Із цих залежностей витікає, що найбільша похибка має місце для апроксимаційної функції  $q(1,2)$  – 3,6 %, а найменша – для апроксимаційної функції  $q(3,4)$  – 1,5 %.



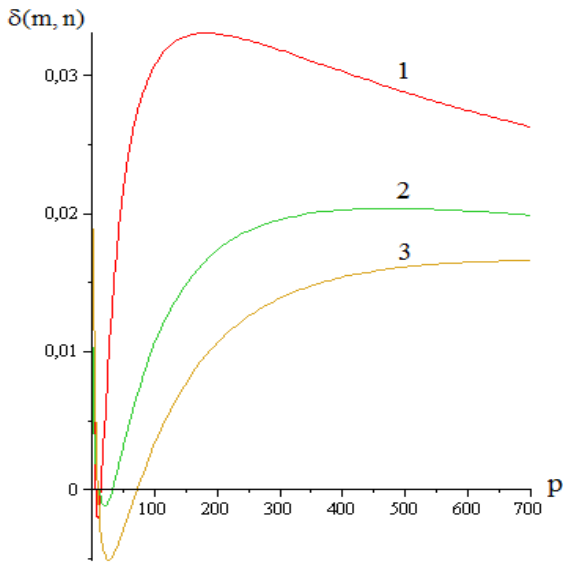


Рис. 1. Залежності похибок розбіжності між функціями  $q(p)$  та  $q(m, n)$ : 1 – для  $q(1,2)$ ; 2 – для  $q(2,3)$ ; 3 –  $q(3,4)$

Із цих залежностей витікає, що найбільша похибка має місце для апроксимаційної функції  $q(1,2)$  – 3,6 %, а найменша – для апроксимаційної функції  $q(3,4)$  – 1,5 %.

Вирази для функції  $q(m, n)$  можна переписати наступним чином

$$\begin{aligned}
 q(m, n) &= \left[ \sum_{i=0}^m a_i p^i \right] \left[ \sum_{j=0}^n b_j p^j \right]^{-1} = \\
 &= \left[ \sum_{i=0}^m a_i p^i \right] \left[ b_n \prod_{k=1}^n (p - p_k) \right]^{-1} = \\
 &= \sum_{k=1}^n A_k (p - p_k)^{-1}, \quad (7)
 \end{aligned}$$

де  $p_k$  – корені характеристичного рівняння Гурвіца;  $A_k$  – параметри, значення яких визначаються рішеннями системи рівнянь

$$\sum_{k=1}^n A_k \prod_{k=1}^n (p - p_k) = \sum_{i=0}^m a_i p^i. \quad (8)$$

При  $\tau_k = -p_k^{-1}$ ,  $B_k = A_k \tau_k$  вираз (7) трансформується до вигляду

$$q(m, n) = \sum_{k=1}^n B_k (\tau_k p + 1)^{-1}, \quad (9)$$

в якому  $\tau_k$  –  $k$ -та постійна часу, а  $B_k$  –  $k$ -й коефіцієнт передачі.

В термінах технічної кібернетики вираз (9) формалізує паралельне з'єднання  $n$  аперіодичних ланок із параметрами  $B_k$  та  $\tau_k$  [9]. В табл. 2 наведені значення параметрів  $B_k$  та  $\tau_k$  для функцій  $q(2,3)$  та  $q(3,4)$

Таблиця 2  
Значення параметрів  $B_k$  та  $\tau_k$

k	q(2,3)		q(3,4)	
	$B_k$	$\tau_k$	$B_k$	$\tau_k$
1	0,192	0,017	0,131	0,009
2	0,379	0,360	0,216	0,130
3	0,938	1,960	0,360	0,699
4			0,243	2,439

Вираз (9) дозволяє дуже просто визначити реакцію пожежі при її гасінні розпиленою водою на характер інтенсивності її подачі та інші параметри та характеристики процесу гасіння. Зокрема, при подачі розпиленої води, інтенсивність якої змінюється у відповідності із виразом

$$I(t) = I_0 l(t), \quad (10)$$

де  $I_0 = \text{const}$ ;  $l(t)$  – функція Хевісайда, для температури поверхні горючої рідини має місце

$$\theta_n(t) = DL^{-1} \left[ \sum_{k=1}^n B_k [p(\tau_k p + 1)]^{-1} \right], \quad (11)$$

В цьому виразі  $L^{-1}$  – оператор зворотного перетворення Лапласа;  $D$  – параметр

$$D = \text{ra} K I_0 [V \lambda (T_k - T_0)]^{-1}. \quad (12)$$

Якщо врахувати співвідношення

$$\sum_{k=1}^n B_k = 1,0, \quad (13)$$

то вираз (11) трансформується наступним чином

$$\theta_n(t) = D \left[ 1 - \sum_{k=1}^n B_k \exp(-t \tau_k^{-1}) \right]. \quad (14)$$

В термінах технічної кібернетики цей вираз є перехідною функцією пожежі при її гасінні розпиленою водою.

Для моделі пожежі при її гасінні розпиленою водою у вигляді (3) температура за умови (10) має опис у вигляді [8]

$$\begin{aligned} \theta_0(t) &= DL^{-1} \left[ p \left[ 0,5 + (p + 0,25)^{0,5} \right]^{-1} \right] = \\ &= D \left[ 1 + \left( \frac{t}{\pi} \right)^{0,5} \exp(-0,25t) - \right. \\ &\quad \left. - (1 + 0,5t) \operatorname{erfc}(0,5t^{0,5}) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

На рис. 2 наведені залежності для відносних похибок розбіжності  $\Delta_n(t)$  між функцією (15) та функціями (14) із параметрами відповідно табл. 2

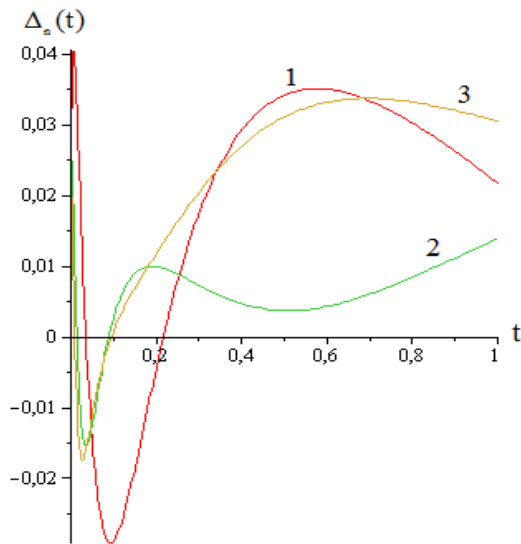


Рис. 2. Залежності похибок розбіжності між функціями  $\theta_0(t)$  та  $\theta_n(t)$ : 1 – для  $\theta_1(t)$ ; 2 – для  $\theta_2(t)$ ; 3 – для  $\theta_3(t)$

Із аналізу цих залежностей витікає, що максимальна величина похибки розбіжності не перевищує 4,0%, що відповідає другому порядку полінома Гурвіца в передаточній функції (5). При використанні Паде – апроксимації передаточної функції (4) такому значенню відносної похибки розбіжності буде відповідати поліном Гурвіца восьмого порядку [10], що суттєво ускладнює структуру передаточної функції пожежі.

Внаслідок цього при виборі математичного опису пожежі класу В при її гасінні розпиленою водою доцільно в якості першого наближення обирати такий опис у вигляді передаточної функції, яка представляє дрібно-раціональну функцію із

поліномом Гурвіца другого порядку, тобто при  $m = 1, n = 2$ .

## Висновки

1. Здійснений перехід від ірраціональної форми представлення передаточної функції пожежі горючої рідини при її гасінні розпиленою водою до дрібно-раціональної форми її представлення. Такий перехід здійснено із використанням мінімаксної апроксимації на основі реалізації алгоритму Ремеза.

2. За допомогою метода невизначених коефіцієнтів побудовані передаточні функції пожежі при їх гасінні розпиленою водою, які представляють суперпозицію декількох передаточних функцій аперіодичних ланок, для яких наведені значення їх параметрів.

3. Показано, що похибка апроксимації за допомогою мінімаксного методу не перевищує 4.0% для порядків поліномів Гурвіца, величини яких не перевищують чотирьох.

## Література

1. Fuchs P. (1984) On the extinguishing effect of of various extinguishing agents and extinguishing methods with different fuels. *Five safety*, v. 7, № 2, pp. 165-175. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(84\)90037-7](https://doi.org/10.1016/0379-7112(84)90037-7)
2. Smith D.P. (1995) Water mist fire suppression systems. *Fire Safeti Eng*, 79.
3. Тарахно О.В. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній службі / О.В. Тарахно, А.Я. Шаршанов. – Х.: АЦЗУ, 2004 – 252 с.
4. Шевчук В.Г. Фізичні основи пожежовибухонебезпеки: навч. посіб. для вузів / В.Г. Шевчук, Д.Д. Поліщук. - Одеса: Астропринт, 2010. – 244 с.
5. Абрамов Ю.А. Математические модели объекта управления системы водяного автоматического пожаротушения / Ю.А. Абрамов, В.П. Садковой // *Коммунальное хозяйство городов*. – К.: Техніка, 2007. - Вип. 74. С. 413-419.
6. Садковой В.П. Упрощенная математическая модель объекта управления систем автоматического пожаротушения / В.П. Садковой, Ю.А. Абрамов // *Научный вестник будівництва*. – Х.: ХДТУБА, 2007. – вип. 43. – С. 142-146.
7. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики. Харьков: МОУ МВД Украины, 1993 – 288 с.
8. Садковой В.П. Теоретические основы автоматического тушения пожаров класса Б распыленной водой / В.П. Садковой, Ю.А. Абрамов. – Х.: НУГЗУ, 2010. – 267с.
9. Артюшин Л.М. Теоретичні основи технічної кібернетики / Л.М. Артюшин, Б.В. Дурняк, О.А. Машиков, Д.М. Плаценко – Львів: УАД, 2004. – 130с.
10. Абрамов Ю. Модели и характеристики процесса тушения пожаров класса В // Ю. Абрамов, А. Басманов. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 186с.

## References

1. Fuchs P. (1984) On the extinguishing effect of of various extinguishing agents and extinguishing methods with different fuels. *Five safety*, v. 7, № 2, pp. 165-175. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(84\)90037-7](https://doi.org/10.1016/0379-7112(84)90037-7)

2. Smith D.P. (1995) Water mist fire suppression systems. *Fire Safeti Eng*, 79.
3. Tarakhno O., Sharshanov A. (2004) Fizyko-khimichni osnovy vykorystannia vody v pozhezhnii sluzhbi. Kh.: ATsZU, 252.
4. Shevchuk V., Polishchuk D. (2010) Fizychni osnovy pozhezhovybukhonebezpeky. Odesa: Astroprint, 244.
5. Abramov Yu., Sadkovoï V. (2007) Matematycheskye modely ob'ekta upravleniia systemy vodianoho avtomatycheskoho pozharotusheniia. *Municipal economy of cities*, 74, 413-419.
6. Sadkovoï V., Abramov Yu. (2007) Uproshchennaia matematycheskaia model ob'ekta upravleniia system avtomatycheskoho pozharotusheniia. *Naukovyi visnyk budivnytstva. Kh.: KhDTUBA*, 43, 142-146.
7. Abramov Yu.A. *Osnovy pozharnoi avtomatyky*. Kharkov: MOU MVD Ukraïny, 1993 – 288 s.
8. Sadkovoï V.P., Abramov Yu.A. (2010) Teoretycheskye osnovy avtomatycheskoho tusheniia pozharov klassa B raspylennoi vody. Kh.: NUHZU, 267.
9. Artiushyn L.M., Durniak B.V., Mashkov O.A., Plashchenko D.M. (2004) Teoretychni osnovy tekhnichnoi kibernetiky. Lviv: UAD, 130.
10. Abramov Yu., Basmanov A. (2017) Modely u kharakterystyky protsessa tusheniia pozharov klassa B. *LAP LAMBERT Academic Publishing*, 186.

**Рецензент:** д.т.н., професор, головний науковий співробітник наукового відділу з проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру О.Є. Басманов, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

**Автор:** АБРАМОВ Юрій Олексійович  
доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник науково-дослідного центру Національний університет цивільного захисту України  
E-mail - [abramov121146@gmail.com](mailto:abramov121146@gmail.com)  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7901-3768>

**Автор:** КОЛОМІЄЦЬ Валерій Станіславович  
викладач кафедри організації та технічного забезпечення аварійно – рятувальних робіт Національний університет цивільного захисту України  
E mail - [kolomiets@nuczu.edu.ua](mailto:kolomiets@nuczu.edu.ua)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4058-4026>

**Автор:** СОБИНА Віталій Олександрович  
кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри організації та технічного забезпечення аварійно – рятувальних робіт Національний університет цивільного захисту України  
E mail - [sobol\\_84@ukr.net](mailto:sobol_84@ukr.net)  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6908-8037>

## MODELS OF FIRE EXTINGUISHING WHEN FLAMMABLE LIQUID COMBUSTION

Y. Abramov, V. Kolomiets, V. Sobyna

National University of Civil Defense of Ukraine, Ukraine

*The process of extinguishing a class B fire with sprayed water is described by the differential equation of heat conduction with boundary conditions of the second kind. The solution of this differential equation in a dimensionless form allows to make a transition to the operative form of representation of the mathematical model of the quenching process - to the transfer function. The peculiarity of such a fire transfer function when extinguishing it with sprayed water is its irrationality, which causes difficulties in its use. One of the ways out of this situation is to switch to an equivalent representation of an irrational function of a complex variable in the form of a small-rational function of such a variable. Such a transition is carried out with the help of the minimax approximation using the Remez algorithm. Determination of the maximum order of the characteristic polynomial of the fire transfer function is carried out using the Hurwitz stability criterion. It is shown that for the transfer function of class B fire, the order of the Hurwitz polynomials does not exceed four, the approximation error does not exceed 3.6% using the method of undetermined coefficients, the transfer functions of the fire when they are extinguished with sprayed water are constructed in the form of a superposition of the transfer functions of aperiodic links. Numerical values of the parameters of such transfer functions were obtained. For the case when the intensity of the sprayed water supply is described by the Heaviside function, expressions describing the temperature of the surface of the burning liquid were constructed. It is noted that these expressions correspond to the expressions that describe the dynamic properties of class B fire in the time domain. It is shown that the maximum value of the relative error when using such transfer functions does not exceed 4.0%, if the general transfer function represents the superposition of the transfer functions of two aperiodic links. It is noted that when using the Padé approximation, the transfer function in the form of the transfer functions of eight aperiodic links corresponds to this value of the divergence error.*

**Keywords:** flammable liquid, fire extinguishing, sprayed water, transfer function.

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Абрамов Ю.О.	188,194	Сременко С.А.	179,280	Наливайко Т.Т.	65	Сушко Н.С.	252
Азаренко О.В.	269	Землянський О.М.	199	Нелін С.О.	136,152	Табачников С.В.	65
Алейнікова А.І.	118	Касьянов В.В.	152	Нестеренко С.Г.	136	Телюра Н.О.	27
Барбашин В.В.	262,286	Кобзан С.М.	141	Нешпор О.В.	179	Тишкевич О.П.	45
Блажко В.В.	17	Коваленко Л.Б.	167	Одегов М.М.	293	Тіщенко В.С.	293
Бутенко А.А.	102	Ковальчук В.С.	147	Олейник О.С.	210	Трошкін С.Е.	199
Буц Ю.В.	286	Коломієць В.С.	194	Осиченко Г.О.	38,45	Троян В.І.	147
Величко В.А.	167	Кондращенко О.В.	125,130	Отрош Ю.А.	210,219	Усенко Д.В.	87
Вірченко В.І.	27	Корчагін П.О.	280	Пальченко О.Л.	172	Фролов В.О.	136
Воробйов О.М.	33	Кравцов М.М.	206	Пілічева М.О.	125,130	Фролов О.В.	136
Вороненко І.В.	118	Крайнюк О.В.	286	Пінчук Н.М.	87	Харів В.В.	136,152
Воронков О.О.	141	Крейзер І.І.	79	Плясуля С.В.	27	Хмиров І.М.	280
Вотінов М.А.	55	Кривцова В.І.	188	Поморцева О.Є.	141,157	Хмирова А.О.	280
Галкін А.С.	299,304	Крупницька Д.А.	27	Понкратов Д.П.	304	Худяков І.О.	2
Гармаш Б.К.	262	Куницький М.О.	113	Разінкін Н.С.	10	Цопа В.А.	252
Гончаренко Ю.Ю.	269	Куракова Н.О.	33	Рашкевич Н.В.	210,219,232	Чеберячко С.І.	252
Горб О.І.	157	Куш Є.І.	304	Решетченко А.І.	33	Чепурна О.Є.	10
Горбаченко С.А.	10	Логвіненко О.А.	293	Рубан Л.І.	38	Чуб О.М.	79
Гулевський П.Ю.	118	Лю Чан	167	Рюмін В.В.	92	Шаповал С.В.	210
Давідіч Ю.О.	304	Майборода Р.І.	219	Сасенко Л.В.	17	Шароватова О.П.	252
Дерев'янок О.А.	179	Мамонов К.А.	147,157	Сасенко Н.В.	17	Шевченко О.С.	269
Дерюгін О.В.	252	Мележик Р.С.	219	Самчук Г.О.	304	Шевченко Р.І.	179,269,280
Дівізійнюк М.М.	269	Метешкін К.О.	130	Семко О.В.	87	Щербак О.С.	179,280
Діденко Д.В.	72	Михайлова С.О.	262	Скрипинець А.В.	17	Штерндок Е.С.	125
Діденко К.В.	72	Михайлюк А.О.	188	Смірнова О.В.	55	Шумаков І.В.	65
Діденко Н.В.	286	Мозговий А.О.	102	Собина В.О.	194	Юрга Т.В.	199
Дорожко Є.В.	65	Мороз М.О.	262	Солодовник Ю.Ю.	92	Юрченко В.О.	33
Древаль І.В.	38	Наливайко Т.А.	65,157	Сухонос М.К.	2		

**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**  
**КОМУНАЛЬНЕ ГОСПОДАРСТВО МІСТ**  
**НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК**  
**Серія: «Технічні науки та архітектура». Том 4. Випуск 178**

Технічний редактор Є.М. Дроботова  
Дизайн обкладинки А.О. Богославець

З електронною версією статей НТЗ «Комунальне господарство міст» можна ознайомитися на сайті збірника: <http://khg.kname.edu.ua> та в цифровому репозиторії ХНУМГ ім. О.М. Бекетова: <http://eprints.kname.edu.ua>

НТЗ «Комунальне господарство міст» пройшов індексацію в міжнародній базі **Index Copernicus International** та включений до бази даних **Index Copernicus International Journals Master List 2020**.

**ICV 2020 становить 64.71**

<https://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=49313>



НТЗ «Комунальне господарство міст» включено до **Directory of Open Access Journals (DOAJ)** — міжнародного мультидисциплінарного каталогу журналів відкритого доступу.

Здано до склад 10.08.2023 р.  
Формат 60×84/8  
Наклад 50 прим.  
Ціна договірна

Підписано до друку 31.08.2023 р.  
Папір офсетний  
Зам. №

Гарнітура «Times New Roman»  
Ум.-друк. арк. – 13,4  
Обл.-вид. арк. – 13,7

Адреса редакції: 61002, місто Харків, вул. Маршала Бажанова, 17  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова