

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

ВІСТІ

ДОНЕЦЬКОГО ГІРНИЧОГО ІНСТИТУТУ

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Виходить 2 рази на рік

Заснований у липні 1995 року

2 (51)' 2022

В журналі публікуються наукові статті за результатами досліджень і розробок в галузі технічних наук. Журнал розрахований на наукових співробітників, інженерно-технічних робітників підприємств, проектних організацій, навчальних та науково-дослідних інститутів, докторантів та аспірантів.

Засновник та видавець – Донецький національний технічний університет

Головний редактор: С.В. Подкопаєв, д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна).

Заступник головного редактора: Д.А. Чепіга, канд. техн. наук (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна)

Відповідальний секретар: О.О. Ісаєнков, канд. техн. наук доцент, (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна).

Англомовний редактор: М.М. Кабанець, д-р. пед. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна).

Міжнародна редакційна колегія: R. M. Bhattacharjee, Professor (Indian Institute of Technology, Dhanbad Jharkhand, India); Nestor Oszczypko, Professor, Dr of Sciences (Institute of Geological Sciences Jagellonian University, Krakow, Poland); Józef Parchański, Prof. Dr.-Ing., Dr.h.c. (Politechnika Śląska, Gliwice, Poland); Andrzej Solecki, Professor, Dr of Sciences (Institute of Geological Sciences Wrocław University, Wrocław, Poland); Upendra Kumar Singh, Professor (Indian Institute of Technology, Dhanbad Jharkhand, India).

Національна редакційна колегія: О.В. Агафонов, д-р техн. наук, с.н.с. (ПРАТ «Донецьксталь», м. Покровськ, Україна); С.М. Александров, д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); В.І. Альохін, д-р геолог. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); Б.В. Болібрех, д-р техн. наук, проф. (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна); І.М. Бубняк, канд. геол. наук, доц. (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна); О.В. Вовна, д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); С.М. Гапєєв, д-р техн. наук., доц. (НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна); В.А. Глива, д-р техн. наук, проф. (Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна); В.Б. Гого, д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); І.О. Єфремов, д-р техн. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); І.В. Іорданов, канд. техн. наук (ТОВ «ТЕТЗ-Інвест», м. Київ, Україна); О.Е. Кіпко, д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); В.К. Костенко д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); О.С. Кружилко, д-р техн. наук, с.н.с. (ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м.Маріуполь, Україна); В.В. Левіт, д-р техн. наук, проф. (ПРАТ «Донецьксталь», м. Покровськ, Україна); Я.О. Ляшок, д-р економ. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); А.В. Мерзлікін, канд. техн. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); С.П. Мінеєв, д-р техн. наук, проф. (Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова, м. Дніпро, Україна); С.Г. Негрій, канд. техн. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); Т.О. Негрій, канд. техн. наук, доц. (ДВНЗ «Київський національний університет будівництва і архітектури», м. Київ, Україна); І.О. Садовенко, д-р техн. наук, проф. (НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна); І.Г. Сахно, д-р техн. наук, проф. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); Н.Ю. Ляшок, канд. ек. наук, доц. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна); С.В. Сукач, д-р техн. наук, доц. (Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна); О.М. Шашенко, д-р техн. наук, проф. (НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна); С.І. Чеберячко, д-р техн. наук, проф. (НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна).

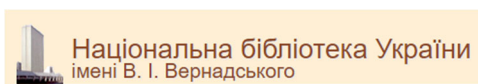
Технічні редактори: А.В. Петренко, М.О. Григорєць (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Покровськ, Україна).

Журнал «Вісті Донецького гірничого інституту» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (технічні науки)», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, наказ №374 від 13 березня 2017 р.

Журнал «Вісті Донецького гірничого інституту» внесено до категорії “Б” “Переліку наукових фахових видань України”, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук за спеціальностями 184–“Гірництво” та 263–“Цивільна безпека” (рішення Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, наказ №975 від 11 липня 2019 р. Діє з 11.07.2019 р.)

Журнал зареєстрований в Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Свідоцтво: серія КВ, №7378 від 03.06.2003.

Електронна версія журналу зберігається у [Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського](#), внесено до [Національного репозитарію академічних текстів](#). Журнал індексується у загальнодержавній базі даних «Україніка наукова», а також у міжнародних наукометричних базах даних: [Index Copernicus](#), [Citefactor](#), [International Society for Research Activity \(ISRA\) Journal Impact Factor \(JIF\)](#), [International Accreditation and Research Council \(IARC\)](#), [Root Society for Indexing and Impact Factor, Service \(Rootindexing\)](#), [General Impact Factor \(GIF\)](#), [Academic Resource Index \(ResearchBib\)](#).



**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
STATE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION
“DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY”**

**JOURNAL
OF DONETSK MINING INSTITUTE**

Ukrainian scientific and technical journal

Published 2 issues per year

Founded in July, 1995

2 (51)' 2022

Lutsk-2022

The journal publishes research papers on the results of research and development in the field of engineering sciences. The journal is intended for scientists, engineers and technicians of enterprises, design organizations, educational and research institutions, doctorates and postgraduates.

Founder and publisher - Donetsk National Technical University

Editor-in-chief: S. Podkopaiev, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine)

Deputy Editor-in-chief: D. Chepiga, PhD. Tech. Sci (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine)

Executive Editor: O. Isayenkov, PhD. Tech. Sci (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine)

English language editor: M. Kabanets, PhD. Ped. Sci (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine).

International Editorial Board: R. M. Bhattacharjee, Professor (Indian Institute of Technology, Dhanbad Jharkhand, India); Nestor Oszczytko, Professor, Dr of Sciences (Institute of Geological Sciences Jagellonian University, Krakow, Poland); Józef Parchański, Prof. Dr.-Ing., Dr.h.c. (Politechnika Śląska, Gliwice, Poland); Andrzej Solecki, Professor, Dr of Sciences (Institute of Geological Sciences Wrocław University, Wrocław, Poland); Upendra Kumar Singh, Professor (Indian Institute of Technology, Dhanbad Jharkhand, India).

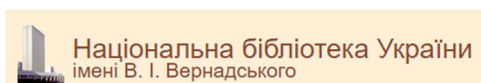
National Editorial Board: O. Agafonov, Dr. Econ. Sci., Prof. (PJSC “Donetskstal”, Pokrovsk, Ukraine); S. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine); V. Alokhin, Dr. Geolog. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine); B. Bolibrukh, Dr. Tech. Sci., Prof. (Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine); I. Bubniak, Dr. Geolog. Sci., Prof. (Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine); A. Vovna, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine); S. Hapieiev, PhD. Tech. Sci. (National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine); V. Glyva, Dr. Tech. Sci., Prof. (National Aviation University, Kiev, Ukraine); V. Hoho, Dr. Tech. Sci., Prof. (Industrial institute SHEI “Donetsk National Technical University”, Pokrovsk, Ukraine); I. Yefremov, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine); I. Iordanov, PhD. Tech. Sci. (LLC “TETZ-Invest”, Kiev, Ukraine); O. Kipko, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine); V. Kostenko, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine); O. Kruzhilko, Dr. Tech. Sci., Sen. Research (Technical University Metinvest Polytechnic LLC, Mariupol, Ukraine); V. Levit, Dr. Tech. Sci., Prof. (PJSC “Donetskstal”, Pokrovsk, Ukraine); I. Liashok, Dr. Econ. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine); A. Merzlikin, PhD. Tech. Sci (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine); S. Miniciev, Dr. Tech. Sci., Prof. (Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine); T. Nehrii, PhD. Tech. Sci (Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, Ukraine); I. Sadovenko, Dr. Tech. Sci., Prof. (National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine); I. Sakhno, Dr. Tech. Sci., Prof. (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine); S. Nehrii, PhD. Tech. Sci (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine); S. Sukach, Dr. Tech. Sci., Prof. (Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine); O. Shashenko, Dr. Tech. Sci., Prof. (National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine); N. Liashok, PhD Econ. Sci (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine); S. Cheberyachko, Dr. Tech. Sci., Prof. (National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine).

Technical editors: A. Petrenko, M. Hryhorets (Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine).

Journal of Donetsk mining institute is included in the “List of scientific professional publications of Ukraine in which results of doctoral and PhD dissertations in engineering can be published” approved by the Certifying Board of MES of Ukraine on academic boards, order number 374 of March 13, 2017.

Journal of Donetsk mining institute is indexed in international scientometric database «Google Scholar», presented in the top research libraries of Ukraine, electronic version of the journal is included in the Vernadsky National Library of Ukraine.

The journal is registered in the State Committee on Information Policy, Television and Broadcasting of Ukraine. Certificate: KB 7378 from 03.06.2003.



ISSN 1999-981X

© The authors of the publications, 2022

ЗМІСТ

Безуглий Я.П., Отрош Ю.А., Майборода Р.І., Рашкевич Н.В. Будівництво дрібних захисних фортифікаційних споруд – залізобетонних бліндажів циліндричної форми заводського виготовлення	7
Бойченко Е.Г., Ткачук О.М. Дослідження деформаційних характеристик ціликів вугілля як охоронних споруд підготовчих виробок	14
Голінько В.І., Грідяєв В.В. Прогнозування ризику виникнення професійних захворювань пилової етіології	25
Єжов В.В., Рясний В.М., Євстратенко І.А., Чухарєв С.М., Корнієнко В.Я. Розроблення рекомендацій щодо попередження аварій та аварійно-небезпечних ситуацій на гірничорудних підприємствах України	35
Ковальов А.І., Пурденко Р.Р., Отрош Ю.А., Томенко В.І., Качкар Є.В., Майборода Р.І. Оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих балок	43
Круковський О.П., Круковська В.В., Адорська Л.Г., Буліч Ю.Ю. Розвиток і застосування технології опорно-анкерного кріплення гірничих виробок в умовах вугільних шахт України	54
Малашкевич Д.С., Петльований М.В., Сай К.С., Саїк П.Б., Клименко І.Ю. Підвищення енергетичного потенціалу вугілля при відпрацюванні малопотужних запасів шахт Західного Донбасу	67
Мінєєв С.П., Демченко С.В., Янжула О.С., Макаренко Р.В. Експериментальні дослідження теплофізичних властивостей гірських порід	78
Рудаков Д.В., Ядзюнь Сунь, Інкін О.В. Методика оцінки балансу та якості підземних і шахтних вод у системі гідравлічно поєднаних шахт	85
Руднєв Є.С., Антощенко М.І., Філатьєва Е.М., Філатьєв М.В. Сукупності шахтопластів за вмістом водню в органічній (горючій) масі та мінеральних домішках викопного вугілля	93
Сергієнко О.І., Ляшок Я.О., Сергієнко Л.В., Подкопаєв С.В., Когтєва О.П. Прогнозування параметрів вивалоутворення в очисних вибоях глибоких вугільних шахт	108
Хорольський А.О. Результати досліджень із розробки системи підтримки прийняття рішень для проектування процесів освоєння родовищ корисних копалин	122
Ярошовець-Баранова К.А., Вдовиченко А.І. Торф як альтернативне джерело енергії	136

CONTENTS

Bezugliy Y., Otrosh Y., Maiboroda R., Rashkevich N. Construction of small protective fortification structures - factory-produced cylindrical reinforced concrete dugouts	7
Boichenko He., Tkachuk O. Research of the deformation characteristics of coal pillars protective structures of haulage drifts	14
Golinko V., Hrydyaev V. Prediction of the risk of occupational diseases of dust etiology	25
Ezhov V., Riasnyi V., Yevstratenko I., Chukharev S., Korniyenko V. Developing recommendations for preventing accidents and emergencies at mining enterprises in Ukraine	35
Kovalov A., Purdenko R., Otrosh Yu., Tomenko V., Kachkar E., Maiboroda R. Assessment of fire resistance of fireproof steel beams	43
Krukovskyi O., Krukovska V., Adorska L., Bulich Yu. Development and application of the bearing-bolt supporting technology in the conditions of Ukrainian coal mines	54
Malashkevych D., Petlovanyi M., Sai K., Saik P., Klymenko I. Increasing the energy potential of coal while development of low-thickness reserves in the Western Donbas mines	67
Minieiev S., Demchenko S., Yanzhula O., Makarenko R. Experimental studies of thermophysical properties of mountain solids	78
Rudakov D., Sun Yajun, Inkin O. A method for evaluating the balance and quality of groundwater and mine water in the system of hydraulically connected mines	85
Rudniev Ye., Antoshchenko M., Filatieva E., Filatiev M. Sets of coal seams by hydrogen content in the organic (combustible) mass and mineral impurities of fossil coals	93
Serhiienko A., Liashok Ia., Serhiienko L., Podkopaiev S., Kohtieva O. Prediction of the parameters of the cave-in rock formation in roof of the longwall of coal mines	108
Khorolskyi A. Results of research on the development of a decision support system for the design of mineral deposits development processes	122
Yaroshovets-Baranova K., Vdovichenko A. Peat as an alternative source of energy	136

УДК 614.841.332

<https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-2-43-53>

А.І. Ковальов
Р.Р. Пурденко
Ю.А. Отрош
В.І. Томенко
Є.В. Качкар
Р.І. Майборода

ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ СТАЛЕВИХ БАЛОК

Мета. Розробка комп'ютерної моделі для дослідження вогнестійкості сталевих конструкцій, захищених вогнезахисними покриттями, на прикладі вогнезахисної сталеві балки, яка створена в програмному комплексі ЛІРА-САПР (Україна).

Методи. Метод кінцевих елементів, застосування розрахункових методів чисельного моделювання програмного комплексу ЛІРА-САПР, математичне моделювання теплових процесів нестационарної теплопровідності.

Результати. Розроблено комп'ютерну модель в програмному комплексі ЛІРА-САПР, за допомогою якої проведено теплотехнічний розрахунок балки. Модель дозволяє оцінювати вогнестійкість як незахищених, так і вогнезахисних сталевих балок, враховувати властивості матеріалу балки та матеріалу вогнезахисного покриття. Особливістю моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві балки полягає у задаванні теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття при розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності. Результати розрахункового визначення вогнестійкості вогнезахисної сталеві балки порівнювали з експериментальними даними. В результаті встановлено задовільну збіжність результатів розрахункового та експериментального дослідження вогнестійкості (похибка не більше 12%). Проаналізовані результати експериментального визначення вогнестійкості ненавантажених балок в умовах вогневого впливу стандартного температурного режиму пожежі. Проведено оцінку точності розробленої комп'ютерної моделі з результатами експерименту.

Наукова новизна. Розроблено скінченно-елементну модель вогнезахисної сталеві балки в програмному комплексі ЛІРА-САПР, що дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків точністю проводити розрахунок меж вогнестійкості балок, захищених вогнезахисними покриттями з науково обґрунтованими параметрами.

Практична значимість. Полягає у створенні основ щодо розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій, захищених вогнезахисними покриттями, шляхом створення комп'ютерних моделей, здатних проводити розрахунок вогнестійкості. За рахунок цього має відбутися значне здешевлення робіт з оцінювання вогнестійкості і, як наслідок, підвищення ефективності заходів з підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій.

Ключові слова: вогнестійкість, комп'ютерна модель, моделювання, сталеві балка, чисельне моделювання, ЛІРА-САПР.

Вступ.

Глобалізація у світі призводить до посилення техногенних чинників. Проблема захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру, а також від небезпек військового характеру, у сучасних умовах набуває особливої значущості. Це обумовлено щорічним стійким зростанням кількості і масштабів катастроф, істотним зростанням людських і матеріальних втрат. Підвищення рівня пожежної безпеки будівель та споруд є однією з найважливіших складових забезпечення захисту населення та економіки від сучасних загроз. Пожежі і вибухи на таких об'єктах небезпечні не лише людськими, але і значними матеріальними витратами, що пов'язані з ліквідацією

наслідків руйнувань і відновленням працездатності об'єктів.

Нові технології будівництва передбачають широке застосування різноманітних будівельних матеріалів та конструкцій, застосування яких передбачає обов'язкові нормативні вимоги в частині дотримання безпеки експлуатації будівель та споруд. Одним з факторів, на якому ґрунтуються вимоги пожежної безпеки під час проектування, будівництва, реконструкції, зміни функціонального призначення будівель та споруд різного призначення є забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій. Для цього на об'єктах різного призначення необхідно забезпечити збереження несучої здатності будівельних конструкцій, в тому числі і сталевих. Одним із пріоритетних напрямків

забезпечення вогнестійкості будівель та споруд є використання вогнезахисних будівельних конструкцій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Велика кількість робіт присвячена питанням оцінювання вогнестійкості вогнезахисних і незахищених сталевих конструкцій. В [1] запропоновано використовувати програмне забезпечення SAFIR, за допомогою якого розроблено кінцево-елементну модель для чисельного моделювання поведінки будівельних конструкцій при дії вогнища пожежі. Однак незважаючи на практичну значимість таких результатів слід зазначити, що поза увагою дослідників залишилися питання моделювання теплового стану вогнезахисних сталевих конструкцій. Очевидно це пов'язано з труднощами побудови вогнезахисної конструкції у вказаному програмному комплексі і правильному і точному задаванні параметрів вогнезахисних покриттів. В [2] описуються експериментальні дослідження поведінки при підвищених температурах незахищених і вогнезахисних сталевих балок, що мають різні розміри і форму отворів. Експерименти показали суперечливі дані щодо вогнестійкості балок при підвищених температурах, виду матеріалу вогнезахисного покриття і його мінімальної товщини. При цьому відсутні достовірні дані щодо поведінки інших вогнезахисних конструкцій при підвищених температурах. В [3] наведені дані щодо побудови скінченно-елементних моделей сталевих балок, використовуючи сучасні програмні комплекси ANSYS та OpenSEES. Моделі дозволяють враховувати вплив температурного режиму пожежі та постійного механічного навантаження. Однак, до недоліків дослідження слід віднести неможливість врахування в процесі моделювання наявності систем вогнезахисту. Спроби зняти вказані обмеження наводяться в [4], де проведено чисельне моделювання поведінки сталевих конструкцій підданих впливу вогнища пожежі. Проте, незважаючи на переваги такого підходу, відкритим залишається питання дослідження вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. В [5]

наводяться результати експериментального дослідження вогнезахисних характеристик спучених покриттів, які піддалися впливу трьох нестандартних кривих пожежі. Ефективну теплопровідність спучених покриттів розраховували на основі вимірної температури сталі та печі. Однак незважаючи на практичну значимість таких результатів слід зазначити, що поза увагою дослідників залишилися питання моделювання теплового стану вогнезахисних сталевих конструкцій і порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. У [6] наводяться експериментальні дані щодо випробувань, проведених на сталевих пластинах, з різними геометричними розмірами. Пластини були захищені реактивними вогнезахисними покриттями на водній основі. Експерименти були направлені на дослідження теплових властивостей вогнезахисних сталевих пластин при різних температурних режимах пожежі: стандартному та режиму, що повільно розвивається. Однак, поза увагою дослідників залишилися питання розрахункового визначення вогнестійкості конструкцій, використовуючи сучасні програмні комплекси. В [7] приведені результати експериментальних досліджень вогнестійкості сталевих балок без вогнезахисту. Температури, отримані в результаті експерименту, порівняли з розрахунками, виконаними згідно Єврокоду 3. Проте, методи, що запропоновані в даному дослідженні, не дозволяють оцінювати вогнестійкість балок, покритих вогнезахисними покриттями. В [8] досліджено поведінку сталевих порожнистих колон при підвищених температурах. Розроблені кінцево-елементні моделі для чисельного моделювання поведінки сталевих колон за підвищених температур. Проте не визначено, як дані моделі можливо застосовувати для вогнезахисних сталевих конструкцій. З практичної точки зору це може викликати труднощі, що пов'язані з врахуванням теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів для підвищення меж вогнестійкості сталевих конструкцій. В [9] авторами проведено експериментальне дослідження круглих заповнених бетоном сталевих трубчастих колон, захищених реактивними вогнезахисними покриттями згідно стандарту ISO-834. Проте недослідженими залишилися питання

визначення меж вогнестійкості будівельних конструкцій із сталі за допомогою комп'ютерного моделювання теплових процесів, що відбуваються у конструкціях, із застосуванням сучасних програм. Це накладає певні обмеження на аналіз вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій.

Систематизація проведених досліджень дає змогу констатувати тенденцію поширення підходів до дослідження вогнестійкості сталевих конструкцій з вогнезахистом за допомогою розроблених комп'ютерних моделей в сучасних ліцензованих програмних комплексах. Такий підхід повинен враховувати можливість прогнозування меж вогнестійкості конструкцій із сталі з врахуванням типу вогнезахисного покриття, характеристик матеріалу конструкції та покриття, зміни режимів пожежі для різних завдань підвищення рівня пожежної безпеки на об'єктах. Метод, розроблений на основі вищезгаданого підходу, повинен бути адекватним, інформативним, а результати, отримані в результаті використання методу, – відтворюваними та стійкими.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність можливості визначення меж вогнестійкості конструкцій із сталі з вогнезахистом за допомогою адекватних комп'ютерних моделей, які дозволили б моделювати нестационарний прогрів таких конструкцій. При цьому, такі моделі повинні мати можливість визначати температуру в будь-якому перерізі конструкції (в будь-якій точці та момент часу) за умов впливу стандартизованих температурних режимів пожежі та враховувати параметри систем вогнезахисту. Модель повинна базуватися на отриманні

результатів з необхідною для інженерних розрахунків точністю як з використанням даних експериментальних досліджень, так і розрахунковими методами.

Мета статті (постановка завдання).

Проведені дослідження ставили за мету розробку комп'ютерної моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних сталевих конструкцій на прикладі вогнезахисної сталеві балки, яка створена в програмному комплексі ЛПА-САПР (Україна).

Основні завдання дослідження:

- побудувати комп'ютерну модель нестационарного прогріву коротких сталевих вогнезахисних ненавантажених балок двотаврового перерізу для оцінювання вогнестійкості в програмному комплексі ЛПА-САПР;
- провести моделювання прогріву сталеві балки із системою вогнезахисту без прикладення навантаження;
- оцінити точність розробленої комп'ютерної моделі вогнезахисної сталеві балки.

Методи дослідження.

Об'єктом випробування були дві сталеві балки ІРЕ 400 (приведена товщина 5,309 мм, коефіцієнт перерізу $A_m/V=188,4 \text{ м}^{-1}$), довжиною по 1 м, які перед нанесенням вогнезахисної речовини були покриті шаром ґрунту ГФ-021 товщиною 0,05 мм. Товщина покриття для зразка балки № 1 складала 0,232 мм, для зразка балки № 2 – 1,183 мм. До нанесення покриття згідно до ДСТУ Б В.1.1-17-2007 на кожній короткій балці встановлювалося по 10 термопар ТХА, схема розміщення яких представлена на рис. 1.

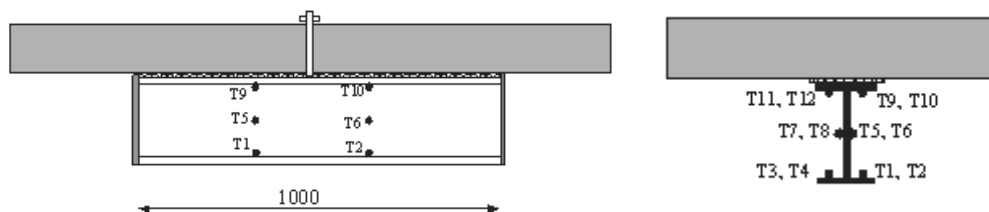


Рис. 1. Схема розташування термопар на ненавантаженої балці.

Бокові торці балок закривалися накладками з теплоізоляційних плит товщиною 40 мм за допомогою 4 шпильок на кожному зразку. Зразки коротких балок приєднувалися (підвішувалися) через шар

мулітокремнеземистого фетру (керамічна мінвата) до плит покриття печі (товщиною 250 мм) за допомогою шпильок.

Середня витрата реактивної вогнезахисної речовини в рідкому стані під час нанесення складала $1,79 \text{ кг/м}^2$. Температура повітря при експериментах складала 27°C , а відносна вологість повітря 54% . На рис. 2

зображено загальний вигляд балки №1 з мінімальною товщиною вогнезахисного покриття до (а) та після (б) проведення випробувань.



Рис. 2. Вогнезахисна сталева балка (№ 12) до (а) та після (б) проведення експерименту з мінімальним значенням товщини вогнезахисного покриття.

Експерименти проводили в випробувальній печі (СВП-1) № 2 (атестат № 24-2/1918), використовували засоби

вимірювальної техніки, що були метрологічно повірені.

Експерименти проводили згідно стандартного температурного режиму пожежі, що показано на рис. 3.

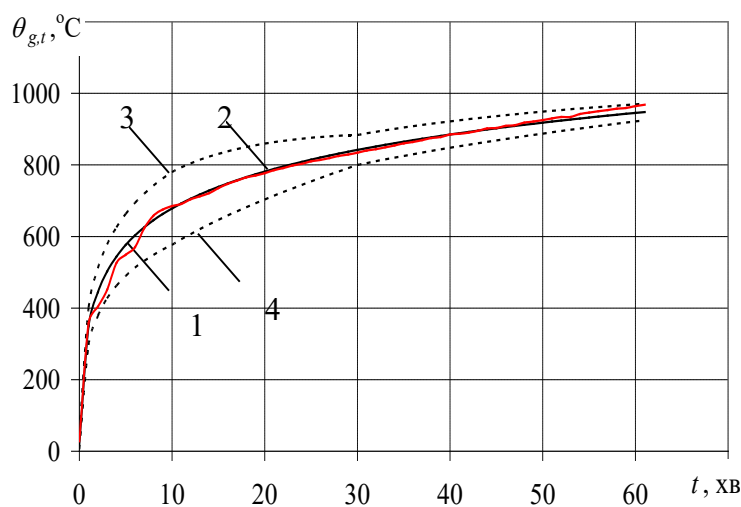


Рис. 3. Температурний режим при проведенні випробування балки №1 з мінімальною товщиною вогнезахисного покриття: 1 – стандартний режим; 2 – реальний режим; 3 – максимальний режим; 4 – мінімальний режим.

Залежність середніх температур зразків коротких сталевих балок з реактивним вогнезахисним покриттям мінімальної та максимальної товщини від часу вогневого впливу стандартного температурного режиму пожежі показано на рис. 4.

З температурами, представленими на рис. 4, порівнювали розрахункові температури, отримані в результаті моделювання теплового впливу на сталеву

балку із вогнезахистом виконані в ЛПРА-САПР.

Побудова комп'ютерної моделі нестационарного прогріву вогнезахисної сталеві балки

Алгоритм розробки комп'ютерної моделі нестационарної теплопровідності сталеві балки із вогнезахистом в програмі ЛПРА-САПР, являв собою систему рівнянь, розв'язок яких дозволив отримати значення температури у кожному вузлі координатної

сітки так, щоб її вузли розміщувалися по товщині і по периметру перерізу. Найважливішим етапом кінцево-елементного аналізу є створення сітки кінцевих елементів.

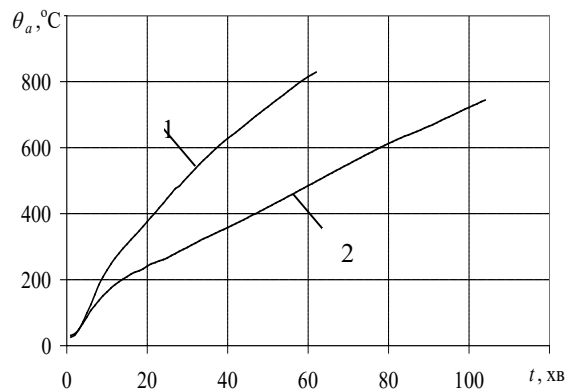
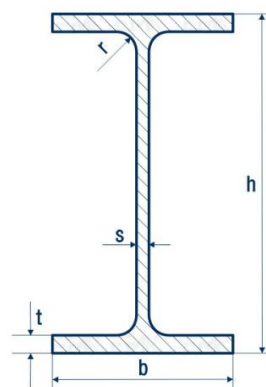


Рис. 4. Залежність середніх температур зразків коротких сталевих балок з реактивним вогнезахисним покриттям мінімальної та максимальної товщини: 1 – зразок балки № 1; 2 – зразок балки № 2.



a



б

Рис. 5. Загальний вигляд (*a*) та геометричні розміри (*б*) сталевих балок.

Зменшення розмірів призведе до збільшення значної кількості кінцевих елементів, а це призведе до збільшення часу розрахунку і використання більш потужної обчислювальної техніки, а на аналіз результатів впливу не матиме. На рис. 5 показано загальний вигляд (*a*) та вигляд поперечного перерізу сталевих балок (*б*) для моделювання її створення в програмному середовищі ЛІРА-САПР.

Було побудовано комп'ютерну модель вогнезахисної сталевих балок, призначено типи жорсткості, вибрано крок розбивки балки на елементи (рис. 6). Модель складається з 42908 елементів. Крок розбиття

Точність розрахунку за допомогою методу кінцевих елементів залежить від правильного вибору типів та розмірів кінцевих елементів. Була обрана прямокутна сітка з чотирма вузлами, що дає точніші результати, ніж сітка з трикутними елементами, що пояснюється наступним чином. Дрібна сітка потрібна там, де очікується великий градієнт деформацій чи напруг (отвір, виточення, тріщина тощо). У той же час сітка великих розмірів може застосовуватися в зонах з деформаціями або напруженнями, що мало змінюються, а також в областях, що не становлять особливої цікавості для розрахунків. Таким чином, сітка кінцевих елементів має в основі наближені до квадратів елементи, що є для розрахунку матриці ідеальним варіантом, довжина елементів не перевищує 1/10 розміру поперечного перерізу, що відповідає рекомендації по формуванню сітки кінцевих елементів.

по перерізу склав $h=0,01$ м, часовий крок $\Delta t=60$ с.

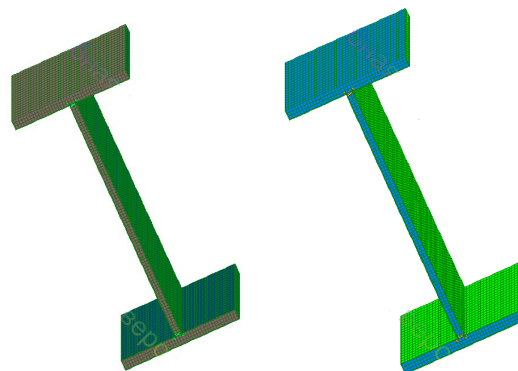


Рис. 6. Модель вогнезахисної сталевих балки в 3D постановці

Алгоритм розрахунку полягав у визначенні температури у кожному вузлі перерізу розробленої розрахункової моделі.

Моделювання нестационарного прогріву вогнезахищеної сталевій балки

Для дослідження вогнестійкості в розрахунках нестационарного прогріву сталевій балки, захищеної вогнезахисним покриттям, використали теплофізичні характеристики покриття [10-11]: коефіцієнт теплопровідності (рис. 7) і питому теплоємність, що дорівнює 70,4 Дж/кг·°С.

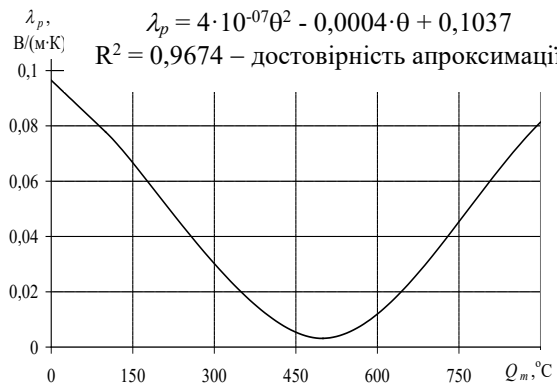


Рис. 7. Коефіцієнт теплопровідності реактивного вогнезахисного покриття.

При розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності визначали залежність температури вогнезахищеної сталевій балки від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі. При цьому використовували математичну модель, яка містить такі рівняння [12, 13]:

$$c_p \rho_p \frac{\partial \theta_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$0 < x < d_p; \quad \theta_p = \theta_p(x, t); \quad 0 < t < t_{fi,requ}$$

$$- \text{початкова умова: } \theta_p(x, 0) = \theta_0, \quad (2)$$

- гранична умова на обігрівній поверхні покриття, при $x = d_p$:

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = \alpha^* (\theta_{g,t} - \theta_m), \quad (3)$$

$$\text{де } \alpha^* = \alpha_c + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\theta_{g,t} + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] / (\theta_{g,t} - \theta_m), \quad (4)$$

- гранична умова на внутрішній поверхні покриття, при $x = 0$:

$$\lambda_p \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = C_a \cdot \rho \frac{V}{A_p} \cdot \frac{\partial \theta_p}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\theta_a(t) = \theta_p(0, t), \quad (6)$$

де x – координата в покритті ($x = 0$ відповідає місцю контакту покриття зі сталевією поверхнею), м;

t – час, с;

$t_{fi,requ}$ – час, який відповідає нормованій межі вогнестійкості;

α_c – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на обігрівній поверхні покриття, $\alpha_c = 25$ Вт/(м·°С);

α^* – сумарний коефіцієнт тепловіддачі конвекцією та тепловою радіацією на неогірівній поверхні балки, $\alpha^* = 5$ Вт/(м·°С);

Φ – кутовий коефіцієнт, $\Phi = 1,0$;

ε_m – коефіцієнт теплового випромінювання обігрівної поверхні покриття, $\varepsilon_m = 0,8$;

ε_f – коефіцієнт теплового випромінювання полум'я, $\varepsilon_f = 1,0$;

σ – стала Стефана Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·°С⁴);

θ_a – температура сталі, °С;

$\theta_{g,t}$ – температура газового середовища в момент часу t , яка змінюється за стандартним температурним режимом пожежі (рис.3), °С;

θ_m – температура обігрівної поверхні покриття, °С;

θ_0 – початкова температура, $\theta_0 = 20$ °С;

θ_p – температура покриття, °С;

λ_p – коефіцієнт теплопровідності покриття, Вт/(м·°С);

c_a – питома теплоємність сталі, Дж/(кг·°С);

c_p – питома теплоємність покриття, Дж/(кг·°С);

ρ_p – густина покриття, $\rho_p = 1420$ кг/м³ (дані виробника);

ρ_a – густина сталі, $\rho_a = 7850$ кг/м³;

A_p/V – коефіцієнт перерізу вогнезахищеної сталевій балки, м⁻¹.

Теплопровідність λ_a (Вт/(м·°С)) та питому теплоємність сталі c_a (Дж/(кг·°С)) визначали за формулами згідно [14].

Коефіцієнт Пуассона сталі $\nu = 0,3$, модуль пружності – $E_s = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Розподіли температур у вогнезахищеній сталевій балці, отримані чисельним моделюванням в умовах випробувань при стандартному температурному режиму пожежі, показані на рис. 8.

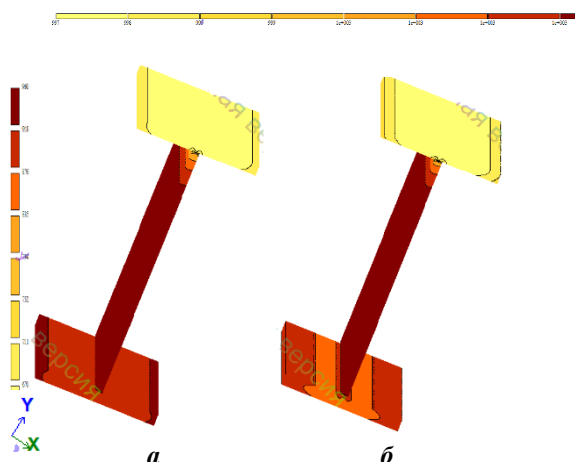


Рис. 8. Розподіл температур в вогнезахисній сталевій балці з *максимальною* товщиною вогнезахисного покриття на 90 (а) та 103 (б) хвилині випробування.

Розроблена модель в програмному комплексі ЛПРА-САПР враховує радіаційно-конвективний теплообмін у газовому середовищі від джерела теплового впливу до поверхні вогнезахисної сталевій балці та теплообмін теплопровідністю у вогнезахисній балці. Під час моделювання нестационарного прогріву вогнезахисної сталевій балки в програмному комплексі ЛПРА-САПР використана модель балки (рис. 8, 9), яка обігривається з трьох сторін за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

На рис. 9 показано розподіл температур в вогнезахисній сталевій балці з мінімальною товщиною вогнезахисного покриття на 30 (а), 45 (б) та 61 (в) хвилині випробування.

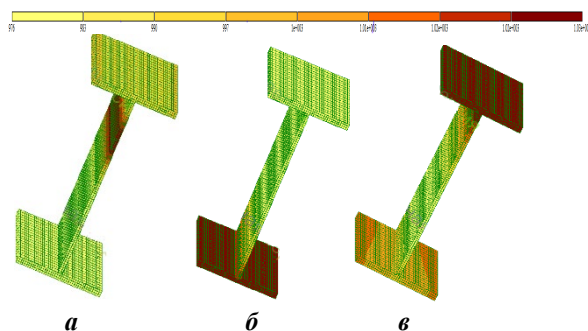


Рис. 9. Розподіл температур в вогнезахисній сталевій балці з *мінімальною* товщиною вогнезахисного покриття на 30 (а), 45 (б) та 61 (в) хвилині випробування.

Розрахунки проводилися на ліцензованому програмному забезпеченні в програмному комплексі ЛПРА-САПР

(ліцензія № 1/8583 від 16.02.2022).

Оцінка точності розробленої комп'ютерної моделі вогнезахисної сталевій балки

Як видно з рис. 10 розрахункова крива 2 співпадає з експериментальною кривою 1. При цьому максимальне відхилення температури від експериментальних значень спостерігалось до 10 хвилини розрахунку і становило 13 °С, що відповідає похибці не більше 12 %.

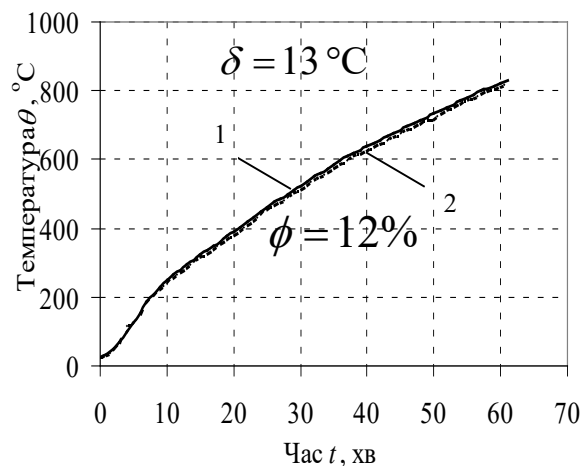


Рис. 10. Середня температура короткої вогнезахисної сталевій балки № 1:
1 – експеримент; 2 – розрахунок.

Дані, зображені на рис. 10, вказують на правильність задавання параметрів моделі в процесі моделювання теплового впливу на конструкцію в системі «сталеві балка – вогнезахисне покриття». Результати розрахунків співпадають з результатами експериментальних досліджень (похибка 12 %), що дозволяє з достатньою для інженерних розрахунків точністю оцінювати вогнестійкість вогнезахисних сталевих конструкцій, а саме балок двотаврового перерізу. Виходячи з результатів, зображених на рис.10, можна констатувати факт щодо правильності створення комп'ютерної моделі вогнезахисної сталевій балки в програмному комплексі ЛПРА-САПР, правильності задавання параметрів моделі, початкових та граничних умов. Для доведення цього твердження достатньо дослідити характер кривих зміни середньої температури вогнезахисної сталевій балки від часу вогневого впливу (рис. 10). Це не розходиться з експериментальними даними (рис.10, крива

1), так як розрахункова крива (рис.10, крива 2) зміни середньої температури вогнезахищеної балки від часу вогневого впливу задовільно корелює з експериментальною. Це в свою чергу говорить про задовільну адекватність розробленої комп'ютерної моделі для оцінювання вогнестійкості вогнезахищеної сталеві балки [13].

Обговорення результатів.

Мету роботи було вирішено шляхом оцінювання вогнестійкості сталевих балок із вогнезахистом шляхом розробки комп'ютерної моделі, яка створена в програмному комплексі ЛПРА-САПР (Україна). За допомогою розробленої моделі було проведено оцінювання вогнестійкості вогнезахищеної сталеві балки, що полягало у розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності і зводилося до визначення температури сталі балки із вогнезахистом у будь-якій точці поперечного перерізу в заданий проміжок часу (рис. 8, 9). Розрахунки підтвердили правильність задавання граничних умов, параметрів фізичної та математичної моделей, що дозволили з точністю до 12 % розрахувати розподіл температур у захищаємій конструкції. Підтвердженням цьому є дані рис. 10, на якому видно задовільну збіжність експериментальних та розрахункових температур. Особливістю розробленої моделі є можливість здійснювати прогрів сталевих конструкцій з урахуванням теплофізичних характеристик матеріалів та врахування складного теплообміну. Запропонована модель дозволяє досліджувати фізичні процеси, що відбуваються саме в вогнезахищених конструкціях із сталі, з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів. Таких переваг, що проявляються у можливості врахування характеристик вогнезахисних покриттів, не вдалося досягнути у відомих роботах [1, 3], так як не вдалося врахувати теплофізичні характеристики (теплопровідність, теплоємність) вогнезахисних покриттів у вигляді залежностей від температури та

побудувати скінчено-елементну модель вогнезахищеної конструкції. Розвиток даного дослідження може полягати у розробці комп'ютерної моделі, яка б дозволяла оцінювати вогнестійкість будівель та споруд при сумісній роботі як сталевих, так і залізобетонних вогнезахищених і незахищених будівельних конструкцій.

Висновки.

1. Розроблено комп'ютерну модель для розрахунку меж вогнестійкості сталевих конструкцій (на прикладі сталеві балки із вогнезахистом), яка дозволяє моделювати тепловий вплив на конструкцію та враховувати теплофізичні та механічні властивості матеріалів, з яких складається конструкція. Обґрунтовані теплофізичні і механічні властивості матеріалів, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати вогнестійкість вогнезахищеної сталеві конструкції без статичного навантаження.

2. За допомогою розробленої моделі отримано розподіл температур у вогнезахищеній сталеві балці без прикладеного до неї навантаження при заданому температурному режимі пожежі, суть якого полягала у розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності.

3. Проведено оцінку точності розробленої моделі та порівняння результатів експерименту з розрахунковими даними. В результаті встановлено, що розрахункові та експериментальні температури прогріву вогнезахищених сталевих балок задовільно корелюють між собою, а похибка не перевищує 12 %. Це вказує на правильність задавання початкових та граничних умов, побудови комп'ютерної моделі теплових процесів в системі «сталеві конструкція - вогнезахисне покриття». Доведено, що розроблена комп'ютерна модель дозволяє моделювати реальні процеси, що відбуваються при нагріванні ненавантажених вогнезахищених сталевих балок в умовах впливу заданого температурного режиму пожежі.

Список літератури

1. Franssen J. M., Gernay T. Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*.

2017. Vol. 8(3). P. 300–323. URL: <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.

2. Nadjai A., Petrou K., Han S., Ali F. Performance of unprotected and protected cellular beams in fire

- conditions. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 105. P. 579–588.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.150>.
3. Džolev I., Radujković A., Cvetkovska M., Ladinović Đ., Radonjanin V. Fire analysis of a simply supported steel beam using Opensees and Ansys Workbench. In *4th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, Subotica*. 2016. Vol. 22. P. 315–322.
 4. Both I., Wald F., Zaharia R. Benchmark for numerical analysis of steel and composite floors exposed to fire using a general purpose FEM code. *Journal of Applied Engineering Science*. 2016. Vol. 14(2). P. 275–284. URL: <https://doi.org/10.5937/jaes14-8664>.
 5. Wang L., Dong Y., Zhang C., Zhang D. Experimental Study of Heat Transfer in Intumescent Coatings Exposed to Non-Standard Furnace Curves. *Fire Technology*. 2015. Vol. 51(3). P. 627–643. URL: <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0460-7>.
 6. Yew M. C., Ramli Sulong N. H. Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials and Design*. 2012. Vol. 34. P. 719–724. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.032>.
 7. Łukomski M., Turkowski P., Roszkowski P., Papis B. Fire Resistance of Unprotected Steel Beams-Comparison between Fire Tests and Calculation Models. In *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172. P. 665–672. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.078>.
 8. Yan X., Gernay T. Local buckling of cold-formed high-strength steel hollow section columns at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 196. 107403. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107403>.
 9. Song Q. Y., Han L. H., Zhou K., Feng Y. Temperature distribution of CFST columns protected by intumescent fire coating. *Ninth International Conference on Advances in Steel Structures (ICASS'2018)* Hong Kong Institution of Steel Construction. <https://doi.org/10.18057/ICASS2018.P.164>.
 10. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al.; Sadkovyi, V., Rybka, E., Otrosh, Yu. (Eds.) (2021). Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC Technology center, 180. doi: <http://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>.
 11. Kovalov A., Slovinskyi V., Udianskyi M., Ponomarenko I., Anszczak M. Research of fireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method. In *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006 MSF. P. 3–10.
 12. Kovalov A., Otrosh Y., Chernenko O., Zhuravskij M., Anszczak M. Modeling of non-stationary heating of steel plates with fire-protective coatings in Ansys under the conditions of hydrocarbon fire temperature mode. In *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038 MSF. P. 514–523.
 13. ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016. Проектування сталевих конструкцій. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. Чинний від 2017-04-01. Вид. офіц. Київ: НДІБК, 2016. 136 с.
 14. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.
- ### References
1. Franssen, J. M., & Gernay, T. (2017). Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*, 8(3), 300–323. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.
 2. Nadjai, A., Petrou, K., Han, S., & Ali, F. (2016). Performance of unprotected and protected cellular beams in fire conditions. *Construction and building materials*, 105, 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.150>.
 3. Džolev, I., Radujković, A., Cvetkovska, M., Ladinović, Đ., & Radonjanin, V. (2016, April). Fire analysis of a simply supported steel beam using Opensees and Ansys Workbench. In *4th International conference contemporary achievements in civil engineering, Subotica* (Vol. 22, pp. 315-322).
 4. Both, I., Wald, F., & Zaharia, R. (2016). Benchmark for numerical analysis of steel and composite floors exposed to fire using a general purpose FEM code. *Journal of Applied Engineering Science*, 14(2), 275–284. <https://doi.org/10.5937/jaes14-8664>.
 5. Wang, L., Dong, Y., Zhang, C., & Zhang, D. (2015). Experimental study of heat transfer in intumescent coatings exposed to non-standard furnace curves. *Fire Technology*, 51(3), 627–643. <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0460-7>.
 6. Yew, M. C., & Ramli Sulong, N. H. (2012). Fire-resistive performance of intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials and Design*, 34, 719–724. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.05.032>.
 7. Łukomski, M., Turkowski, P., Roszkowski, P., & Papis, B. (2017). Fire resistance of unprotected steel beams-comparison between fire tests and calculation models. In *Procedia Engineering*, 172, 665–672. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.078>.
 8. Yan, X., & Gernay, T. (2022). Local buckling of cold-formed high-strength steel hollow section columns at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 196, 107403. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107403>.
 9. Song, Q. Y., Han, L. H., Zhou, K., & Feng, Y. (2020). Temperature distribution of CFST columns protected by intumescent fire coating. In *Proceedings of the 9th International Conference on Advances in Steel Structures, ICASS 2018*. Hong Kong Institution of Steel Construction. <https://doi.org/10.18057/ICASS2018.P.164>.
 10. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al.; Sadkovyi, V., Rybka, E., Otrosh, Yu. (Eds.) (2021). Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: privat company Technology center, 180. doi: <http://doi.org/10.15587/978-617-7319-43-5>.
 11. Kovalov, A., Slovinskyi, V., Udianskyi, M., Ponomarenko, I., Anszczak, M. Research of fireproof capability of coating for metal constructions using calculation-experimental method. In *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006 MSF. P. 3–10.
 12. Kovalov, A., Otrosh, Y., Chernenko, O., Zhuravskij, M., Anszczak, M. Modeling of non-stationary heating of steel plates with fire-protective coatings in Ansys under the conditions of hydrocarbon fire temperature mode. In *Materials Science Forum*.

2021. Vol. 1038 MSF. P. 514–523. Trans Tech Publications Ltd.
13. DSTU-N В V.2.6-211:2016. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Rozrakhunok konstruktsii na vohnestiikist. Chynnyi vid 2017-04-01. Vyd. ofits. Kyiv: NDIBK, 2016. 136 s (Ukrainian).
14. EN 1993-1-2:2005. Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2, general rules – Structural fire design.

Надійшла до редакції 07.11.2022

Рецензент д-р. техн. наук, с.н.с. Юрій КЛЮЧКА

Ковальов Андрій Іванович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, докторант, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: kovalev27051980@gmail.com

Пурденко Роман Русланович – ад'юнкт, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: proektbs1977@ukr.net

Отрош Юрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, начальник кафедри, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: otrosh@nuczu.edu.ua

Томенко Віталій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, (вул. Онопрієнка, 8; м. Черкаси, Україна, 18034).

E-mail: firech1996@gmail.com

Качкар Євген Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, (вул. Онопрієнка, 8; м. Черкаси, Україна, 18034).

E-mail: kachkar@ukr.net

Майборода Роман Ігорович – викладач, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: maiboroda.roman@ukr.net

ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE OF FIREPROOF STEEL BEAMS

Purpose. Development of a computer model for the study of fire resistance of steel structures protected by fire-resistant coatings, using the example of a fire-resistant steel beam created in the LIRA-SAPR software complex (Ukraine).

Methods. Finite element method, application of computational methods of numerical modelling of the LIRA-SAPR software complex, mathematical modelling of thermal processes of non-stationary thermal conductivity.

Results. A computer model was developed in the LIRA-SAPR software complex, with the help of which thermal engineering calculation of the beam was carried out. The model makes it possible to evaluate the fire resistance of both unprotected and fire-protected steel beams, to take into account the properties of the beam material and the material of the fire-resistant coating. The peculiarity of modelling the non-stationary heating of a fire-resistant steel beam is to specify the thermophysical characteristics of the fire-resistant coating when solving the problem of non-stationary thermal conductivity. The results of the calculated determination of the fire resistance of the fire-resistant steel beam were compared with experimental data. As a result, a satisfactory convergence of the results of the calculation and experimental study of fire resistance was established (the error is no more than 12%). The results of the experimental determination of the fire resistance of unloaded beams under fire conditions of the standard fire temperature regime were analysed. The accuracy of the developed computer model was evaluated with the results of the experiment.

Scientific novelty. A finite-element model of a fire-resistant steel beam has been developed in the LIRA-SAPR software complex, which allows calculating the fire resistance limits of beams protected by fire-resistant coatings with scientifically justified parameters with sufficient accuracy for engineering calculations.

Practical significance. It consists in creating the basis for the calculated assessment of fire resistance of building structures protected by fire-resistant coatings by creating computer models capable of performing fire resistance calculations. Due to this, there should be a significant reduction in the cost of work on fire resistance assessment and, as a result, an increase in the effectiveness of measures to increase the fire resistance of building structures.

Keywords: fire resistance, computer model, simulation, steel beam, numerical simulation, LIRA-SAPR.

Andrii Kovalov – Phd, Senior Research, Doctoral studies, National University of Civil Defence of Ukraine, (Chernyshevsk str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: kovalev27051980@gmail.com

Roman Purdenko – National University of Civil Defence of Ukraine, (Chernyshevsk str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: otrosh@nuczu.edu.ua

Yurii Otrosh – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Fire prevention in settlements, National University of Civil Defence of Ukraine, (Chernyshevsk str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: otrosh@nuczu.edu.ua

Vitalii Tomenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Cherkasy Institute of Fire Safety of National University of Civil Defence of Ukraine, (Onoprienka str., 8, Cherkasy, Ukraine, 18034).

E-mail: firech1996@gmail.com

Evhen Kachkar – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Cherkasy Institute of Fire Safety of National University of Civil Defence of Ukraine, (Onoprienka str., 8, Cherkasy, Ukraine, 18034).

E-mail: kachkar@ukr.net

Roman Maiboroda – teacher, National University of Civil Defence of Ukraine, (Chernyshevska str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: maiboroda.roman@ukr.net