

УДК 614.841.415

Самченко Тарас Васильович

*науковий співробітник відділу речовин і матеріалів науково-випробувального центру
Український науково-дослідний інститут цивільного захисту*

Самченко Тарас Васильевич

*научный сотрудник отдела веществ и материалов научно-испытательного центра
Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты*

Samchenko Taras

*Researcher of the Department of Substances and
Materials of the Scientific and Testing Center
Ukrainian Civil Protection Research Institute*

АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПРИ ПОЖЕЖІ У КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛЯХ

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОМАСООБМЕНА ПРИ ПОЖАРЕ В КАБЕЛЬНЫХ ТУННЕЛЯХ

HEAT EXCHANGING MATHEMATICAL MODELS OF FIRE IN CABLE TUNNELS ANALYSIS

Анотація. У даній роботі проаналізовано методи математичного моделювання та засоби обчислювальної газогідродинаміки, а також переваги їх використання при вивченні впливу пожежного навантаження та конструктивних характеристик кабельних тунелів на температурний режим пожежі.

Проведено аналіз сучасних програмних комплексів CFD та доцільність їх використання під час дослідження пожеж у кабельних тунелях. Описано основні методи вирішення повної системи рівнянь Нав'є-Стокса, що закладаються в алгоритм програмних комплексів.

Для проведення обчислювального експерименту запропоновано застосовувати комп'ютерну систему Fire Dynamic Simulator 6.2. та показано її переваги перед іншими програмними комплексами.

Ключові слова: кабельний тунель, температурний режим пожежі, повна система рівнянь Нав'є-Стокса, математичне моделювання.

Аннотация. В данной работе проанализированы методы математического моделирования и средства вычислительной газогидродинамики, а также преимущества их использования при изучении влияния пожарной нагрузки и конструктивных характеристик кабельных тоннелей на температурный режим пожара.

Проведен анализ современных программных комплексов CFD и целесообразность их использования при исследовании пожаров в кабельных тоннелях. Описаны основные методы решения полной системы уравнений Навье-Стокса, закладываются в алгоритм программных комплексов.

Для проведения вычислительного эксперимента предложено применять компьютерную систему Fire Dynamic Simulator 6.2. и показано ее преимущества перед другими программными комплексами.

Ключевые слова: кабельный тоннель, температурный режим пожара, полная система уравнений Навье-Стокса, математическое моделирование.

Summary. In this paper, the methods of mathematical modeling and means of computational gas hydrodynamics are analyzed, as well as the advantages of their use in studying the impact of fire load and structural characteristics of cable tunnels on the temperature regime of the fire.

The analysis of modern software CFD complexes and the feasibility of their use in the investigation of fires in cable tunnels has been carried out. The methods for solving the complete Navier – Stokes equation system laid down in the algorithm of software complexes are described.

For the computing experiment, it is proposed to use the computer system Fire Dynamic Simulator 6.2. and shows its advantages over other software systems.

Key words: cable tunnel, temperature mode of fire, Navier – Stokes equations system, mathematical modeling.

Постановка проблеми. Незважаючи на значні успіхи у вирішенні завдань щодо підвищення пожежної безпеки кабельної продукції в даній час існує безліч проблемних питань. Кабельна продукція та будівельні конструкції кабельних тунелів повинні відповідати вимогам по ряду показників пожежної безпеки, які встановлені окремими відомчими нормами і правилами для кабелів спеціального призначення. Горіння електричних кабелів супроводжується виділенням значної кількості тепла, яке визначається питомою теплою згоряння матеріалів ізоляції, захисних оболонок кабелів і масою цих матеріалів, що містяться в одиниці довжини кабелю. Як показали досліді зі спалювання потоків кабелів в умовах кабельного тунелю температура в зоні горіння кабелів з ізоляцією з поліетилену або з паперовою просоченою ізоляцією досягає 1000–1200 °С. При цьому спостерігається виділення значного обсягу чорного диму і інших газоподібних продуктів, що призводить до зниження видимості і ускладнює дії персоналу з гасіння пожежі та евакуації людей.

Дослідження температурного режиму пожежі є актуальним питанням, так як в кабельні тунелі відрізняються геометричною конфігурацією, видом кабелів, що прокладені у них, пожежним навантаженням та аеродинамічними характеристиками. Це може привести до того, що температурний режим пожежі у таких тунелях може відрізнитись як від стандартного так і між собою. У такому разі не можна гарантувати відповідність меж вогнестійкості випробовуваних конструкцій чинним нормативам. У цьому випадку може істотно знизиться безпеку людей і матеріальних цінностей під час пожеж у кабельних тунелях.

Для того щоб не проводити дорогі випробування по вивченню даного питання, існує можливість здійснити такі дослідження на основі результатів обчислювальних експериментів. Сучасне програмне забезпечення з моделювання теплових процесів засобами комп'ютерної газодинаміки (CFD), дозволяє врахувати всі необхідні параметри досліджуваних процесів і вивчити вплив геометричних і конструктивних характеристик печі для випробувань залізобетонних конструкцій на якість одержуваних даних.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Ройтман В. М. у роботі [1] запропонував температурний режим пожежі режим пожежі у спорудах підземного типу, зокрема тунелях. Динаміка розвитку пожежі досліджувалась у роботах як українських [2–4] так і зарубіжних вчених [5–8]. У роботі [5] L. Razdolsky описав різновиди математичних моделей для дослідження динаміки розвитку пожеж, проте у його роботі не досліджено специфіку використання засобів комп'ютерної газодинаміки для вивчення пожеж у кабельних тунелях.

Daniel Madrzykowski у 2013 році опублікував роботу [6]. На думку автора дослідження динаміки

розвитку пожеж є надзвичайно важливим не тільки для пожежної науки, а й розроблення нових засобів для попередження і гасіння пожеж. Проте, автор не конкретизував специфіку розвитку пожеж у підземних спорудах.

Роботи [7–8] є дещо застарілими, якщо зважати на темпи розвитку обчислювальної техніки та програмних комплексів CFD.

Щодо українських учених, то Нуянзін О. М. [2] проаналізував математичні моделі тепломасообміну у камерах вогневих печей, а Ковалишин В. В. у своїх дослідженнях [3–4] дослідив динаміку розвитку пожеж у кабельних спорудах та описав зміну температури в зоні горіння без подачі та з подачею інертних газів, але дослідження стосувались лише кабельних тунелів певних геометричних параметрів зі сталим пожежним навантаженням.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Різноманітність конструктивних особливостей кабельних тунелів, їхнього пожежного навантаження, притоку та відтоку газів та інших параметрів зумовлює суттєві відмінності температурних режимів пожежі. Зокрема, сучасна ізоляція кабельної продукції може відрізнитись за пожежно-технічними характеристиками від вивченої вченими [1].

У даній роботі проаналізовано методи математичного моделювання та засоби обчислювальної газодинаміки, а також переваги їх використання при вивченні впливу пожежного навантаження та конструктивних характеристик кабельних тунелів на температурний режим пожежі.

Постановка задачі та її розв'язання. Метою роботи є виявлення найбільш ефективного підходу щодо дослідження температурного режиму під час пожежі у кабельних тунелях шляхом аналізу існуючих методів математичного моделювання процесу тепломасообміну та засобів обчислювальної газодинаміки.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Для математичного обчислення процесу тепломасообміну у кабельних тунелях є можливими для використання інтегральні, зонні та польові моделі [2–10]. Інтегральні моделі дають змогу отримати прогноз середніх значень параметрів стану середовища усередині кабельного тунелю. У зонних моделях весь простір поділяють на характерні просторові зони й визначають середні значення параметрів стану середовища в цих зонах для будь-якого моменту часу. Польові або диференціальні моделі тепломасообміну вможливають прогноз просторово-часового розподілу температур і швидкостей газового середовища у тунелі, концентрацій компонентів середовища, тиску та густин у будь-якій точці, температуру на поверхні будівельних конструкцій та кабелів [9–10].

Польові моделі, позначені в зарубіжній літературі абривіатурою CFD (computational fluid dynamics —

англ. обчислювальна гідродинаміка), є більш потужним та універсальним інструментом, ніж зональні та інтегральні, оскільки ґрунтовані на зовсім іншому принципі. Замість однієї або кількох великих зон у польових моделях виокремлюють численну кількість (зазвичай десятки і сотні тисяч) маленьких контрольних обсягів, не пов'язаних із передбачуваною структурою потоку [8–9]. Для кожного з цих об'ємів за допомогою низки методів розв'язують систему рівнянь у часткових похідних, що виражають принципи локального збереження маси, імпульсу, енергії та інших компонентів. Отже, динаміка розвитку процесів залежить не від апріорних припущень, а лише від результатів розрахунку польових моделей, у яких застосовують повну систему рівнянь Нав'є-Стокса [10].

Згідно з аналізованим підходом, використовують фундаментальні рівняння:

- 1) рівняння руху потоку (рівняння Нав'є-Стокса);
- 2) рівняння нерозривності потоку, що виражене законом збереження матерії;
- 3) рівняння розподілу тепла (рівняння Фур'є-Кіргофа);
- 4) рівняння стану газу;
- 5) рівняння дифузії, що виражає зміну концентрації реагуючого кисню або іншої газової компоненти за умов руху газового потоку;
- 6) рівняння, що виражає закономірність променістого теплообміну в камері печі;
- 7) рівняння швидкості перебігу хімічної реакції;
- 8) стехіометричні рівності реакцій;
- 9) рівняння руху окремих частинок твердого й рідкого палива з урахуванням гальмівного опору несучого середовища;
- 10) рівність надходження й витрат тепла (енергії) у камері печі.

У звичайному вигляді система рівнянь Нав'є-Стокса складається з двох рівнянь:

- рівняння руху,
- рівняння нерозривності.

Для визначення турбулентної в'язкості застосовують різні варіанти, пов'язані зі способами визначення опосередкованих і флуктуаційних складників величин, що входять до рівняння Нав'є-Стокса. Ці способи визначення турбулентної динамічної в'язкості називають моделями турбулентності. Найбільше поширення має стандартна k - ε модель турбулентності [3–8]. Згідно з цією моделлю, динамічну турбулентну в'язкість визначають за виразом:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

де $C_\mu = 0,09$ — сталий коефіцієнт; ε — швидкість дисипації турбулентної енергії; k — турбулентна енергія.

Для визначення величин ε і k використовують рівняння, які доповнюють систему рівнянь Нав'є-Стокса, що мають вигляд:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho V \varepsilon) = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

де G — величина, яку визначають за виразом:

$$G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

де величину D_{ij} визначають як

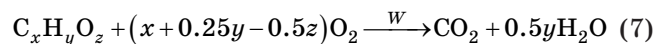
$$D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij} \quad (5)$$

Величину δ_{ij} , яка входить до рівняння (5), визначають як:

$$S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

Інші параметри, що входять до рівняння (2) і (3), є постійними.

Модель горіння визначають за швидкістю світла й витратами палива, окисника і продуктів згорання. Кількісні співвідношення визначені за узагальненим хімічним рівнянням [4]:



Швидкість реакції W визначають за стехіометричним коефіцієнтом:

$$i_{chem} = \frac{32(x + 0.25y - 0.5z)}{12x + y + 16z} \quad (8)$$

Модель горіння Магнуссена може бути використана як модель горіння, згідно з рекомендаціями для заздалегідь незмішаного палива й окисника.

Швидкість змішування та хімічної реакції горіння в моделі Магнуссена визначають за формулою:

$$W_{mix} = 23.6 \left(\frac{\mu \varepsilon}{\rho k^2} \right)^{0.25} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(Y_{C_x H_y O_z}, \frac{Y_O}{i_{chem}} \right) \quad (9)$$

Використовуються рівняння, що враховують радіаційний теплообмін в газовому середовищі та взаємного теплообміну між середовищем і частками, а також твердим матеріалом. Модель побудована на припущенні, що оптичне середовище ізотропне, процес радіаційного теплопереносу описаний рівнянням:

$$\nabla \left(\frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0 \quad (10)$$

де E_r — густина енергії випромінювання; E_b — рівноважна густина енергії випромінювання, що визначають за рівнянням:

$$\alpha E_b = \alpha_m E_{b,m} + \alpha_p E_{b,p} \quad (11)$$

α — інтегральний за спектром коефіцієнт поглинання:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_p \quad (12)$$

β — інтегральний за спектром коефіцієнт розсіювання:

$$\beta = \beta_m + \beta_p \tag{13}$$

У рівняннях (11)–(13) використовувані величини мають такі позначення:

- a_m, a_p — коефіцієнти поглинання відповідно до газового середовища й часток;
- b_m, b_p — коефіцієнти розсіювання відповідно до газового середовища й часток;
- $E_{b,m}, E_{b,p}$ — рівноважна щільність енергії випромінювання для газової фази та фази часток розсіювання відповідно до газового середовища й часток.

Перераховані величини визначають за формулами:

$$E_{b,m} = \sigma T_m^4 \tag{14}$$

$$\alpha_p E_{b,p} = \frac{1}{\Omega_{cell}} \sigma \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j T_{pj}^4 \tag{15}$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j \tag{16}$$

$$\beta_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} (2 - \varepsilon_p) \sum_j \pi r_j^2 N_j \tag{17}$$

де s — стала Стефана-Больцмана; T_{pj} — температура j -тої частки; N_j — кількість часток у комірці; ε_p — ступінь чорноти часток.

Загалом, наявні математичні моделі та їх чисельна реалізація дають змогу точно й ефективно моделювати процес тепломасопереносу у кабельному тунелі. Унаслідок проведення низки послідовних ітерацій, отримаємо значення аналізованих функцій у певний момент часу. Аналогічним чином розраховують значення для кожного моменту часу.

Об’єм обчислень, що необхідно проводити є дуже великим, тому доцільніше перекласти монотонні ітерації в алгоритм для персонального комп’ютера або кластера [10]. Існує багато спеціалізованих про-

грам (рис. 1) для побудови геометричних моделей конструкцій, розподілу конструкцій на більш дрібні елементи та розрахунку поведінки елемента й конструкції в цілому. Вибір конкретного програмного комплексу залежить від особливостей модельованих процесів, можливостей обчислювальної техніки та користувача.

Серед проаналізованих програм більш прийнятною для побудови математичної моделі кабельного тунелю є «Fire Dynamic Simulator 6.2». По-перше, базовими в ній є рівняння Нав’є — Стокса, що описують рух рідин і газів у широкому діапазоні чисел Рейнольдса. По-друге, система дає змогу побудувати геометрію об’єкта без використання спеціальних CAD-програм. По-третє, система «FDS» уможливорює легке корегування параметрів тунелю та граничних умов. По-четверте, система «FDS» має розвинений апарат візуалізації отриманих результатів. По-п’яте, що є немало важливим в умовах сьогодення — вона є безкоштовною [9].

Висновки

1. Для дослідження впливу технологічних та конструктивних параметрів кабельних тунелів на точність та достовірність результатів випробувань ефективно використовувати математичні моделі засновані на повній системі рівнянь Нав’є — Стокса з врахуванням турбулентного горіння в газоповітряному потоці продуктів горіння.

2. Застосування математичних моделей теплообміну дозволяє визначити температурний режим в кабельному тунелі в залежності від конструктивних характеристик та пожежного навантаження.

3. Для проведення чисельного експерименту ефективно застосовувати комп’ютерну систему Fire Dynamic Simulator 6.2, так як у алгоритмі її роботи закладена система рівнянь Нав’є — Стокса, що описує рух рідин і газів у широкому діапазоні чисел Рейнольда, що є характерним для турбулентного

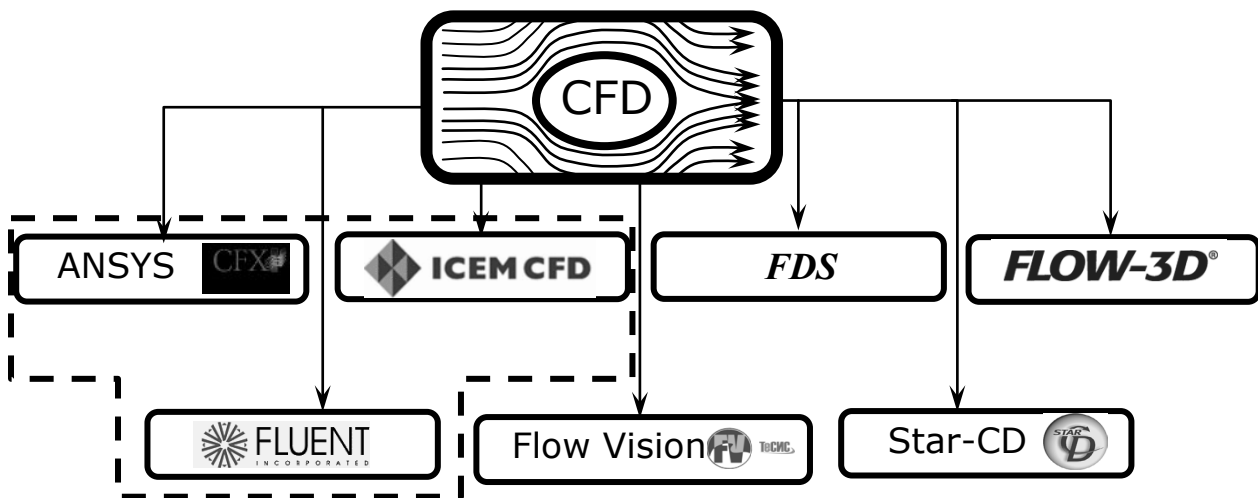


Рис. 1. Сімейство програмних продуктів «CFD», поширених в Україні [10]

Таблиця 1

Характеристики CFD-програм [9–10]

№ з/п	Назва програмного продукту (компанія, розробник)	Короткий опис
1.	«ANSYS CFX» («ANSYS», «Inc» (США)).	Пакет дає змогу розв'язувати широке коло завдань у сфері міцності, тепла, гідрогазодинаміки, електромагнетизму, а також міждисциплінарного аналізу, що об'єднує всі чотири галузі; оптимізувати конструкцію на основі всіх перерахованих типів аналізу.
2.	«ICEM CFD» («ANSYS», «Inc» (США)).	Комплексне розв'язання завдань із генерації розрахункових сіток будь-яких типів, від структурованої багатоблокової до неструктурованої гекса- або тетраедра чи гібридної.
3.	«FLUENT» («ANSYS», «Inc» (США)).	Сучасний програмний комплекс, що допомагає аналізувати широкий спектр промислових завдань, які стосуються динаміки рідини й газу (багатофазних, реагуючих) потоків з урахуванням теплообміну (кондуктивного, конвективного й радіаційного).
4.	«SOFIE» («SP») («Technical Research Institute of Sweden» (Швеція)).	Використання моделей у межах вогневих випробувань має низку застосувань. Гранична умова в моделюваннях — визначення параметрів полум'я. «SP» має одну з найбільших баз даних у Європі та дає підстави для вибору джерела вогню, що буде використане в CFD-моделі.
5.	«STAR-CD» («CD-adapco group» (попередня назва — «Comp. Dynamics Ltd» (США)).	Ефективне паралелізування алгоритму рішення, заснованого на використанні методу кінцевих об'ємів, у поєднанні з унікальними методиками автоматизованого розбиття області течії дають змогу моделювати завдання будь-якого ступеня геометричної складності. Застосовують переважно для моделювання поширення вогню.
6.	«FLOW-3D» («Flow Science Inc» (США)).	Застосовують для точного математичного моделювання процесів гідродинаміки й теплообміну; для розрахунку обмежених і з вільною поверхнею перебігу рідин (турбулентне та ламінарне), гідравлічних ударів, навколзвучового й надзвучового перебігу газів, температурних режимів, фільтрації, обтікання твердих тіл довільної конфігурації та перебігу сумішей. Моделювання завдань конвекції, кавітації, кристалізації, плавлення, теплоперенесення й ін. Широко використовують у металургійному виробництві для всіх способів лиття.
7.	«CFD FlowVision» (Тесис (РФ)).	У теоретичній базі системи «FlowVision» розвинено узагальнений підхід, заснований на усереднюванні за часом (усереднювання за Рейнольдсом) повної системи рівнянь Нав'є-Стокса. Для розв'язання системи рівнянь застосовують метод контрольних об'ємів.
8.	Fire Dynamic Simulator (National Institute of Standards and Technology (США)).	Комп'ютерна програма вирішує чисельно велику хвильову імітаційну форму рівнянь Нав'є-Стокса, яка підходить для низькошвидкісного, термічно керованого потоку, з акцентом на димові та теплові переноси енергії під час пожеж, для опису її розвитку. Програма зчитує вхідні параметри з текстового файлу, обчислює чисельне рішення для рівнянь керування та записує до файлів вказані користувачем вихідні дані.

руху продуктів горіння під час пожежі у кабельному тунелі.

Перспективи подальших досліджень. Серед перспектив подальших досліджень слід виділити

можливість створення математичної моделі кабельного тунелю в комп'ютерній системі Fire Dynamic Simulator 6.2. та проведення обчислювального експерименту з використанням створеної моделі.

Література

1. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / В. М. Ройтман. — М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. — 382 с.
2. Аналіз існуючих математичних моделей тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін / Нуянзін О. М., Поздеев С. В., Сідней С. О Збірник наукових праць АПБ ім. Героїв Чорнобиля № 18/2014 рік. Серія КВ № 13745-2719.
3. Ковалишин В. В. Моделювання впливу парогазових потоків на пожежу в каналах великої довжини / Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. — Київ: УкрНДЦЗ, 2011. — № 1 (23). — С. 191–199.

4. Ковалишин В. В. Перевірка на адекватність моделювання процесів розвитку і гасіння пожеж в кабельних тунелях (в обмежених об'ємах) / Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. — Київ: УкрНДІЦЗ, 2013. — № 1 (27). — С. 38–44.
5. L. Razdolsky. Mathematical Modeling of Fire Dynamics // Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol II WCE2009, July 1–3, 2009, London, U.K.
6. Daniel Madrzykowski. Fire Dynamics: The Science of Fire Fighting // Fire service Journal of Fire Leadership and Management, volume 7, 2013, Fire Protection publications/IFSTA.
7. Razdolsky, L., «Explosion in a High-Rise Building», METROPOLIS&BEYOND Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium New York, NY, 2005
8. Razdolsky, L., Petrov, A., Shtessel, E., «Critical conditions of local ignition in a large medium with convective heat transfer» Physics of combustions and explosions, National Academy of Science, 1977.
9. NIST Special Publication 1018–5 «Fire Dynamics Simulator (Version 5)» Technical Reference Guide, 2008 Volume 1: Mathematical Model
10. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій / Нуянзін О. М., Некора О. В., Поздеев С. В. [та ін.] // Монографія. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, — 120 с.