

УДК 614.841.332

О.М. Нуянзін, к.т.н., С.В. Поздєєв, д.т.н., проф., С.О. Сідней, О.В. Некора, к.т.н., с.н.с.,
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
НУЦЗ України

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОМАСООБМІНУ У КАМЕРАХ ВОГНЕВИХ ПЕЧЕЙ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ НЕСУЧИХ СТІН

У роботі обґрунтовано, що сучасне програмне забезпечення, зокрема моделювання теплових процесів засобами обчислювальної газогідродинаміки («CFD»), дає змогу враховувати всі необхідні параметри аналізованих процесів і досліджувати вплив геометричних та конструктивних характеристик печі для випробувань несучих стін на адекватність результатів.

Ключові слова: повна система рівнянь Нав'є – Стокса, випробування на вогнестійкість, вогнева піч, математичне моделювання.

Постановка проблеми. В умовах пожежі порушення загальної стійкості будівлі завжди відбувається внаслідок руйнування окремих елементів в каркасі споруди. Зважаючи на це, одним із важливих аспектів забезпечення пожежної безпеки у наш час є застосування будівельних конструкцій із гарантованою межею вогнестійкості.

Для визначення фактичних меж вогнестійкості вважається найбільш ефективним метод вогневих випробувань [1, 2]. Тому питання удосконалення та покращення характеристик установок для вогневих випробувань є актуальним і важливим.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. До вогневих печей висуваються особливі вимоги, які полягають в тому що, нагрівальний факел повинен створюватися на рідкому паливі, полум'я факела не повинне торкатися поверхонь елементів конструкцій, що нагріваються, по об'єму нагрівальної камери повинен бути рівномірний розподіл температури і температура протягом випробування в об'ємі нагрівальної камери повинна мінятися за температурним режимом пожежі, визначеним в стандарті [1]. Внаслідок того, що управління паливною системою не може забезпечити повну відповідність режиму нагріву камери печі стандартному температурному режиму пожежі, існує певна похибка реалізації режиму нагріву елемента [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Дослідженням процесу випробувань на вогнестійкість залізобетонних конструкцій займалися і займаються багато вчених, зокрема Яковлев О.І., Ройтман В.М., Харченко І.О., Бушев В.П., Мілованов О.Ф., Фомін С.Л., Страхов В.Л., Круковський П.Г., Новак С.В., Поздєєв С.В., T. Lie, B. Barteleml, G. Kruppa, T. Harmathy, проте в їх роботах недостатня увага приділяється вивченню метрологічних характеристик випробувальних установок та впливу конструктивних особливостей цих установок на адекватність отриманих результатів.

Існує багато конструкцій печей, які розрізняються геометричними конфігураціями, видом паливно-форсуночної системи, схемами розташування та конструкцією виміральної арматури. Це може призвести до того, що різні випробувальні установки можуть давати результати, які відрізняються на 30 і більше відсотків. Якщо йдеться про час, що визначає настання граничного стану, а це фактично час, який потрібен для евакуації людей та матеріальних цінностей, то для REI 60 відхилення може складати близько 20 хвилин, REI 120 – 40 хвилин, REI 150 – 50 хвилин. Це значний проміжок часу, в якому визначається межа вогнестійкості тією чи іншою лабораторією і при цьому немає гарантій, що це не може бути дуже завищений результат. У такому випадку не можна гарантувати безпеку людей та матеріальних цінностей у відповідності до існуючих нормативів.

Постановка задачі та її розв'язання. Метою роботи є проведення аналізу існуючих методів математичного моделювання процесу тепломасообміну у вогневих печах та

визначення з них найбільш ефективного для удосконалення технологічних та метрологічних характеристик випробувальних установок.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Для математичного обчислення процесу тепломасообміну у вогневих печах нині використовують інтегральні, зонні та польові моделі [3–7]. Інтегральні моделі дають змогу отримати прогноз середніх значень параметрів стану середовища в камері печі для будь-якого моменту випробувань. У зонних моделях весь простір камери печі 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 в камері печі, концентрацій компонентів середовища, тиску та густин у будь-якій точці [5].

Польові моделі, позначені в зарубіжній літературі аббревіатурою 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 тисячі або десятки тисяч) маленьких контрольних обсягів, не пов'язаних із передбачуваною структурою потоку [7]. 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 [3-7].

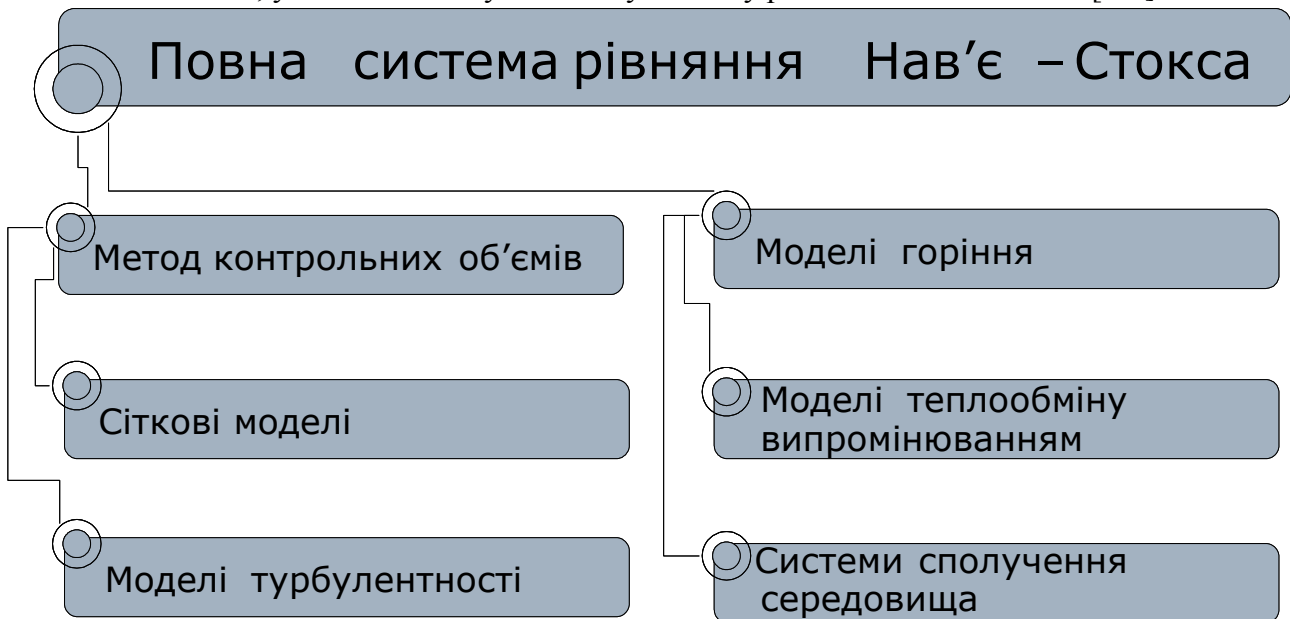


Рисунок 1 – Теоретична база для розв'язку задач теплообміну у вогневих печах.

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;
- до цього списку, як правило, додають:
- 6) рівняння, що виражає закономірність променистого 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 [6]. 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.

Для моделювання реагуючого двофазного потоку рідких часток у рухомому повітрі може бути використана модель «5 газів», згідно з номенклатурою [8]. При цьому модель випару часток реалізують у режимі кипіння відповідно до моделі, представленій формулами:

$$m = Nu \frac{\lambda_g}{d} \frac{1}{Cp_p} \ln \left(1 + \frac{Cp_{vol} (T_g - T_{p,boil})}{h_{lat} (T_{p,boil})} \right) \quad (7),$$

де число Нуссельта визначають за формулою:

$$Nu = 2 + 0.556 Re^{1/2} Pr^{1/3} \left(1 + \frac{1.237}{Re Pr^{4/3}} \right)^{-0.5} \quad (8),$$

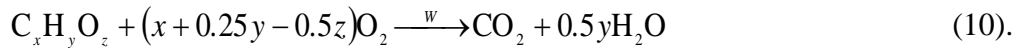
де Cp_p – теплоємність часток; Cp_{vol} – теплоємність летючих; λ_g – коефіцієнт теплопровідності газової фази; T_g – температура газової фази; $T_{p,boil}$ – температура кипіння рідкої фази частки; h_{lat} – прихована теплота утворення газової фази в процесі випаровування.

Рідке паливо (гас) представляє узагальнена хімічна вуглеводнева формула $C_xH_yO_z$ (C_6H_6O). Теплоту згорання рідкого палива визначають за такою формулою:

$$LHV_{liq, fuel} = h_{liq, fuel}^0 - h_{CO_2}^0 \frac{44x}{12x + y + 16z} - h_{H_2O}^0 \frac{9y}{12x + y + 16z} \quad (9),$$

де $h_{lic, fuel}^0$, $h_{CO_2}^0$, $h_{H_2O}^0$ – теплоти утворення гасу, вуглекислого газу й води; x , y , z – стехіометричні коефіцієнти для гасу, що дорівнюють відповідно 6, 6 і 0.

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:

$$i_{chem} = \frac{32(x + 0.25y - 0.5z)}{12x + y + 16z} \quad (11).$$

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:

$$W_{mix} = 23.6 \left(\frac{\mu \varepsilon}{\rho k^2} \right)^{0.25} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(Y_{C_xH_yO_z}, \frac{Y_o}{i_{chem}} \right) \quad (12).$$

Рівняння, що описують моделі теплообміну у вогневій печі для випробувань. Для обліку радіаційного теплообміну в газовому середовищі та взаємного теплообміну між середовищем і частками, а також твердим матеріалом доцільно використовувати дифузійну модель випромінювання газу (P1) [5; 6]. Ця модель побудована на припущенні, що оптичне середовище ізотропне, процес радіаційного теплопереносу описаний рівнянням:

$$\nabla \left(\frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0 \quad (13),$$

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

$$\alpha E_b = \alpha_m E_{b,m} + \alpha_p E_{b,p} \quad (14),$$

α – інтегральний за спектром коефіцієнт поглинання:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_p \quad (15),$$

β – інтегральний за спектром коефіцієнт розсіювання:

$$\beta = \beta_m + \beta_p \quad (16).$$

У рівняннях (14) – (16) використовувани величини мають такі позначення:

- α_m, α_p – коефіцієнти поглинання відповідно до газового середовища й часток;
- β_m, β_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:

$$E_{b,m} = \sigma T_m^4 \quad (17),$$

$$\alpha_p E_{b,p} = \frac{1}{\Omega_{cell}} \sigma \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j T_{pj}^4 \quad (18),$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j \quad (19),$$

$$\beta_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} (2 - \varepsilon_p) \sum_j \pi r_j^2 N_j \quad (20),$$

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

Для опису радіаційного теплообміну між поверхнями обгороджування печі, поверхнями колони й термопари доцільно застосовувати модель «ПП випромінювання», згідно з номенклатурою [8]. Ця модель базована на використанні рівняння радіаційного теплообміну між поверхнями, що має такий вигляд:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - F_{ij}) \sigma T_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - F_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j \quad (21),$$

де δ_{ij} – параметр, який дорівнює 0, якщо $i \neq j$, та дорівнює 1, якщо $i = j$; q_j – поверхневий тепловий потік через i -ту поверхню, яка обмінюється випромінюванням із j -тою поверхню; F_{ij} – променеві форм-фактори, залежні від взаємного розташування i -тої і j -тої площ поверхонь, що обмінюються випромінюванням, які визначають за формулою:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i \quad (22),$$

де: θ – кут між нормаллю до елемента й лінією, що сполучає елементи i та j ; r – відстань між центрами елементів i та j .

Отже, наявні математичні моделі та їх чисельна реалізація дають змогу точно й ефективно змодельовати процес вогневих випробувань залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість.

Унаслідок проведення низки послідовних ітерацій, отримаємо значення аналізованих функцій у певний момент часу.

Аналогічним чином розраховують значення для кожного моменту часу.

Для складних конструкцій обсяг обчислень є дуже великим, тому більш зручно перекласти монотонні ітерації в алгоритм для персонального комп'ютера [6-8]. Існує багато спеціалізованих програм 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. Сутність чисельного експерименту полягає в ініціації процесу горіння з контролем температури в середині моделі термопар так, щоб температурний режим їхнього нагріву якомога точно збігався з температурною стандартною кривою пожежі [8].

На основі математичного моделювання необхідно отримати вплив теплообміну між термопарою й камерою печі, урахувати, який вплив на результати має неоднорідний розподіл температур у камері печі та на поверхні дослідного елемента. Математичне моделювання дає змогу виокремити технологічні параметри печі, підвищивши точність випробувань.

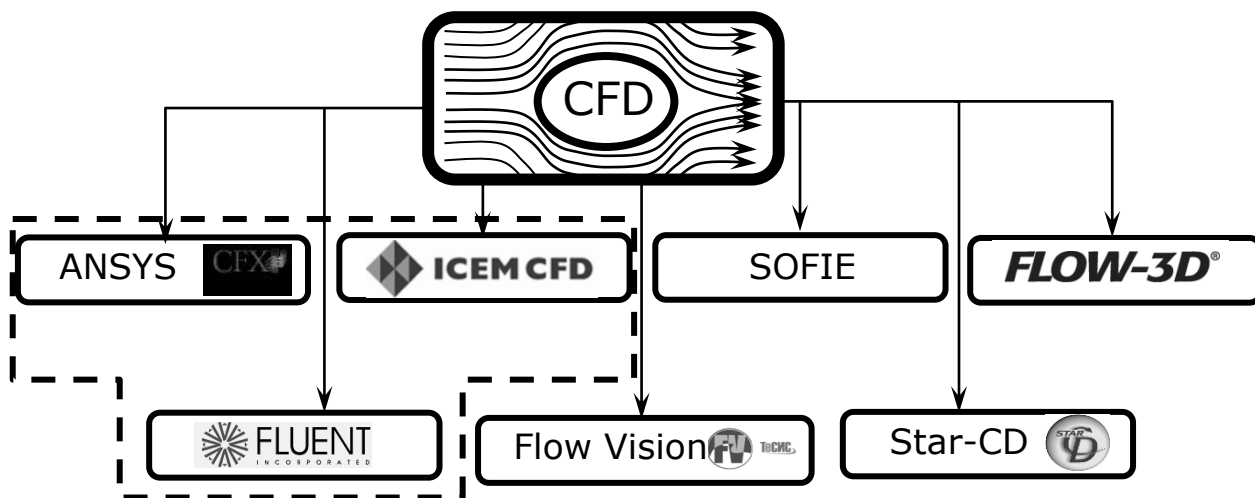


Рисунок 2 – Сімейство програмних продуктів «CFD», поширених в Україні.

Таблиця 1 – Характеристики CFD-програм

№ з/п	Назва програмного продукту (компанія, розробник)	Короткий опис	Примітка
1	2	3	4
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 [9–15].	
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 [9].	

Продовження таблиці 1.

1	2	3	4
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) [9–15].	
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 [9–15].	
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 [13].	Застосовують переважно для моделювання поширення вогню [13].
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, навколосвукового й надзвукового перебігу газів, температурних режимів, фільтрації, обтікання твердих тіл довільної конфігурації та перебігу сумішей. Моделювання завдань конвекції, кавітації, кристалізації, плавлення, теплоперенесення й ін. [9–15].	Широко використовують у металургійному виробництві для всіх способів лиття [9–15].
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].	

Серед проаналізованих програм більш прийнятною для побудови математичної моделі вогневої печі є система «FlowVision 2.5». 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 в спеціалізованих САД-програмах. По-третє, система «FlowVision» уможливує легке корегування параметрів печі в процесі розрахунків. По-четверте, система «FlowVision» має розвинений апарат візуалізації отриманих результатів.

«FlowVision» призначена для розрахунку гідро- й газодинамічних завдань (разом із пов'язаними процесами тепло- та масоперенесення) у широкому діапазоні чисел Рейнольдса й Маха в довільних тривимірних областях.

Базовими в «FlowVision» є рівняння Нав'є – Стокса (разом із рівнянням нерозривності). Для замикання цих рівнянь, залежно від конкретного завдання, використовують додаткові співвідношення, що описують зміну густини, турбулентне перенесення та ін. Набори цих співвідношень у сукупності з рівняннями Нав'є – Стокса називають моделями. У «FlowVision» найбільш повно представлені такі моделі [8]:

– наближення Буссінеска (малі зміни густини) для опису ламінарної течії в'язкої рідини за малих чисел Рейнольдса;

– k-ε модель турбулентної течії в'язкої рідини з невеликими змінами густини за великих чисел Рейнольдса;

– модель слабо стисливої рідини (у термінології «FlowVision»), що дає змогу розраховувати стаціонарний дозвуковий рух газу за будь-яких змін густини;

– модель повністю стисливої рідини (у термінології «FlowVision»): стаціонарний і нестаціонарний рух за будь-яких чисел Маха (до-, транс-, над- і гіперзвукові течії).

«FlowVision» допускає також використання моделі теплоперенесення у твердому тілі, що поєднане з перенесенням тепла й речовини в рідині (газі).

Крім того, у «FlowVision» включені кілька спеціальних моделей (безпосередньо не пов'язаних із рівняннями Нав'є – Стокса), із яких до базової навчальної версії пакету входять тільки моделі вільної поверхні, двофазного потоку й одна з моделей горіння.

Висновки.

1. Для дослідження впливу технологічних та метрологічних параметрів вогневих печей на точність та достовірність результатів випробувань ефективно використовувати математичні моделі засновані на повній системі рівнянь Нав'є – Стокса з врахуванням турбулентного горіння в багатофазному рідкопаливному потоці.

2. Застосування математичних моделей тепломасообміну дозволяє визначити найбільш вагомі параметри вогневих печей, які впливають на ефективність їх роботи.

3. Для проведення чисельного експерименту на основі застосування повної системи рівнянь Нав'є – Стокса ефективно застосовувати комп'ютерну систему CFD FlowVision 2.5.

Перспективи подальших досліджень. Серед перспектив подальших досліджень слід виділити можливість створення математичної моделі вогневої печі в системі FlowVision 2.5 та проведення обчислювального експерименту з використанням створеної моделі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги (ISO 834:1975): ДСТУ Б В.1.1-4-98. – [Чинний від 1998-10-28]. - К.: Укрархбудинформ, 1999. – 21с. – (Державний стандарт України).

ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. – 2000.

2. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. ДБН В.1.1-7-2002. - [Чинний від 2003-05-01]. - К.: Держпожбезпека, 2003. – 87с. – (Державні будівельні норми).

3. Згуря В.І. Удосконалення системи визначення пожежонебезпечних властивостей речовин, матеріалів та будівельних конструкцій : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.02 „Пожежна безпека” / Згуря В.І. – Київ, 2007. – 21 с.

4. Металлургические печи. Теория и расчеты : учебник : в 2-х т. / В. И. Губинский [и др.] ; под общ. ред. В. И. Тимошпольского. – М. : Наука, 1988. – 351 с.

5. Губинский В. И. Теория пламенных печей / В. И. Губинский, Лу Чжун-У. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с.

6. Harmathy T.Z. The fire resistance test and its relation to real world fires. Fire and Materials / Harmathy T.Z., vol. 5, no 3, pp. 59 – 65, 1981.

7. Ошовский В. В. Использование компьютерных систем конечно-элементного анализа для моделирования гидродинамических процессов / В. В. Ошовский, Д. И. Охрименко,

А. Ю. Сысоев // Наукові праці ДонНТУ. – Серія: Хімія і хімічна технологія. – 2010. – Вип. 15 (163). – С. 163–173.

8. Система моделирования движения жидкости и газа. FlowVision Версия 2.5.4. Руководство пользователя. – Москва: ТЕСИС. – 2008. – 284 с.

9. Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. – М. : ДМК Пресс, 2006. – С. 240.

10. Anderson John D. (1995) Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications. Science/Engineering/Math. McGraw-Hill Science

11. Patankar Suhas. (1980) Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science. Taylor&Francis. ISBN 0-89116-522-3

12. Ansys Release 10, inc. Theory Reference.

13. Shah, Tasneem M. An analysis and comparison of tube natural frequency modes with fluctuating force frequency from the thermal cross-flow fluid in 300 MWe PWR / Shah, Tasneem M.; Sadaf Siddiq, Zafar U. Koreshi / International Journal of Engineering and Technology 9 (9): 201–205.

14. Milarcik E. L An Analysis of the Performance of Residential Smoke Detection Technologies Utilizing the Concept of Relative Time / E. L. Milarcik, S. M. Olenick, R. J. Roby // The National Fire Protection Research Foundation Suppression and Detection Research and Applications Symposium (SUPDET), March, 2007. (2007 Carey award).

15. Olenick S. M. An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke / S. M. Olenick, D. J. Carpenter // Journal of Fire Protection Engineering. – 2003. – № 13. – S. 87–110.