

УДК 621.365.3

ЛАЗАРЄВ Т. В., асп.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОЕЛЕКТРИЧНОГО СТАНУ ЗА ДОПОМОГОЮ OpenFOAM

Проведено серію тестових розрахунків з оцінки придатності вільного відкритого програмного коду OpenFOAM для розв'язання термічних та електротермічних задач.

Ключові слова: OpenFOAM, числове моделювання, теплоелектричний стан.

© Лазарєв Т. В., 2013.

Постановка проблеми. Швидкість, точність, мінімальні затрати праці та ресурсів – основні характеристики сучасного підходу до розроблення нового та вдосконалення діючого обладнання та технологічних процесів. Дотримання зазначених вимог можуть гарантувати числові розрахунки з використанням сучасних обчислювальних пристроїв та програмного забезпечення. Цей інструмент дозволяє аналізувати нові рішення ще на початкових стадіях проекту, дозволяє оцінити вплив окремих чинників на результат, вибрати оптимальні співвідношення вихідних параметрів, визначити величини, що складно, а іноді й неможливо знайти експериментальним шляхом.

У світі існує багато програмних продуктів для числового моделювання. Деякі з них є вузькоспеціалізованими, інші дозволяють вирішувати широке коло задач в одному робочому середовищі (ANSYS, ANSYS FLUENT, ANSYS CFX, Nastran, STAR-CD, FLOWVISION, COMSOL Multiphysics, ELMER, OpenCFD). Більшість із них є комерційними продуктами із закритим кодом. Але існують деякі проекти, що працюють на умовах вільного програмного забезпечення, зокрема OpenFOAM.

Продукт OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation), розроблений компанією OpenCFD Ltd, призначений для розв'язання задач гідро- та аеродинаміки нестислого і стислого середовища з використанням різних моделей турбулентності (RANS, LES, DES, DNS); багатофазних задач з урахуванням хімічних реакцій і теплопередачі; задач горіння рідин, газів і твердих частинок; задач електрики та магнетизму; розрахунків на міцність і динаміку твердих тіл; фінансового моделювання [1]. Він поширюється за ліцензією GNU General Public License (GPL), що надає користувачеві право використовувати, копіювати, поширювати, вивчати, змінювати і покращувати програмне забезпечення.

Код OpenFOAM реалізовано так, що більшість диференціальних і тензорних операторів можна навести в інтуїтивно-зрозумілій формі. Як приклад, розглянемо нестационарне рівняння теплопровідності:

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T)\nabla T], \quad (1)$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг · К); ρ – густина, кг/м³; T – температура, К; t – час, с; ∇ – оператор Гамільтона; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · К).

Рівняння (1) в коді OpenFOAM [2]:

```
solve  
(  
    fvm::ddt(cp*rho, T)  
    == fvm::laplacian(lambda, T)  
);
```

 (2)

Для розв'язання численних інженерних задач уже розроблено спеціальні вирішувачі. Зокрема, базовий код chtMultiRegionFoam є вирішувачем нестационарних нелінійних рівнянь теплопровідності без внутрішніх джерел теплоти, а також нерозривності, збереження енергії і моменту імпульсу для рідких середовищ. Особливістю коду chtMultiRegionFoam є те, що, наприклад, стаціонарне поле температур, визначається методом встановлення через розв'язання нестационарної задачі [1, 2].

Невирішеною частиною наукової проблеми є модифікація коду chtMultiRegionFoam для розв'язання теплових задач з наявністю внутрішнього джерела теплоти та задач теплоелектричного стану.

Метою статті є апробація програмного коду OpenFOAM на задачах стаціонарної нелінійної теплопровідності без і з урахуванням внутрішніх джерел теплоти, а також модифікація коду для моделювання проблеми електричного нагрівання твердих тіл.

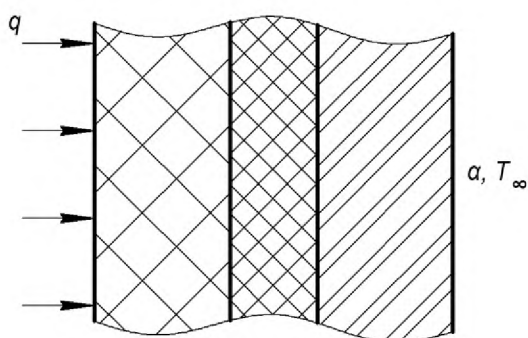


Рис. 1 – Геометрія задачі 1

Викладення основного матеріалу. Для апробації програмного коду OpenFOAM проведено серію тестових розрахунків та їх порівняння з аналітичними розв'язками, а також числовими розв'язками, отриманими з використанням комерційного програмного забезпечення (КПЗ).

Задача 1 – стаціонарна нелінійна теплопровідність у тришаровій плоскій стінці (рис. 1). Геометричну область утворюють три стінки завтовшки 0,4; 0,2 і 0,4 м. Матеріали – вугілля, сажа, шамотна вогнетривка цегла [3]. Межові умови: Неймана – відома густина теплового потоку на поверхні стінки $q = 1000 \text{ Вт/м}^2$; Робена – відомі коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ і температура навколишнього середовища $T_\infty = 300 \text{ К}$. Дискретизація моделі – структурована сітка з 10000 шестигранних елементів еквівалентного розміру. Розв'язки наведено в табл. 1.

турована сітка з 10000 шестигранних елементів еквівалентного розміру. Розв'язки наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Розв'язки задачі 1

Температура	Розв'язок рівняння (1), К		
	аналітичний [4, 5]	розрахунковий, КПЗ	розрахунковий, OpenFOAM
На гарячій стінці	1598,93	1598,82	1598,96
Між стінками 1 і 2	1563,71	1565,58	1565,72
Між стінками 2 і 3	853,09	853,07	853,08
На холодній стінці	442,82	442,82	442,82

Задача 2 – стаціонарна нелінійна теплопровідність із внутрішнім джерелом теплоти (рис. 2). Геометричну область утворюють два однакові ідеально спряжені циліндри діаметром і довжиною 0,2 м кожен.

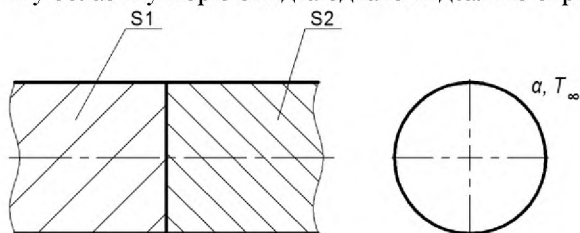


Рис. 2 – Геометрія задачі 2

Теплофізичні властивості циліндрів і внутрішнього джерела – однакові: $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 7,9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $c_p = 1841 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; інтенсивність внутрішнього джерела теплоти $S = 4000 \text{ Вт/м}^3$. Межові умови: на бічній поверхні циліндрів – $\alpha = 7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $T_\infty = 300 \text{ К}$; на зовнішніх торцевих поверхнях – адіабатні. Дискретний аналог геометричної моделі – 28854 гексаедрони.

Рівняння нестационарної нелінійної теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти та його інтерпретація в OpenFOAM:

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T)\nabla T] + S; \quad (3)$$

```

solve
(
    fvm::ddt(cp*rho, T)
    == fvm::laplacian(lambda, T) + source
);
    
```

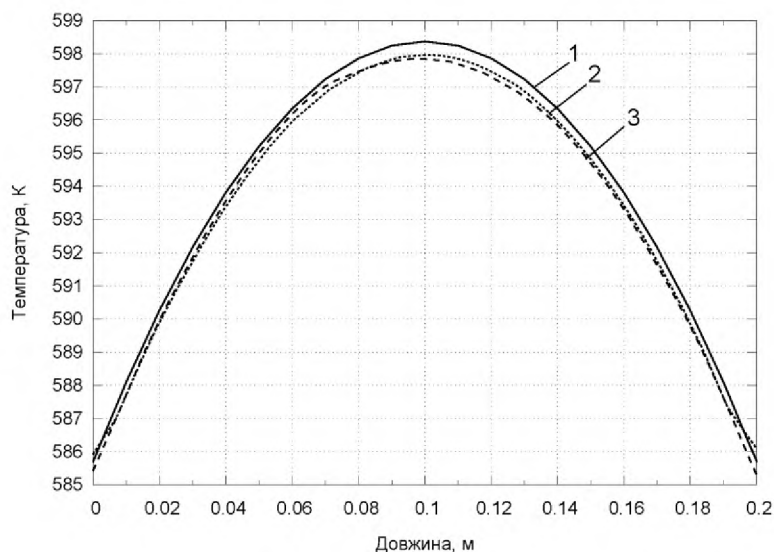
(4)

Розв'язки задачі 2 (табл. 2) порівнювали з аналітичним розв'язком одновимірної лінійної задачі стаціонарної теплопровідності нескінченного циліндра з внутрішнім джерелом теплоти [4, 5] (рис. 3).

Таблиця 2 – Розв'язки задачі 2

Температура	Розв'язок рівняння (3), К		
	аналітичний [4, 5]	розрахунковий, КПЗ	розрахунковий, OpenFOAM
Середня за об'ємом	592,04	591,7	591,65
Максимальна	598,37	598	597,89
Мінімальна	585,71	586,15	585,01

Задача 3 – зв'язана електротермічна; стаціонарне електричне нагрівання трьох зразків квадратного перерізу з розмірами елементів 1, 3 – $0,3 \times 0,2 \times 0,2$; 2 – $0,4 \times 0,2 \times 0,2$, що перебувають в ідеальному контакті торцевими поверхнями (рис. 4). Теплофізичні властивості зразків є однаковими і відповідають задачі 2. Електропровідність центрального зразка $\sigma_2 = 400 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$, бічних – $\sigma_1 = \sigma_3 = 1600 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}^{-1}$.



1 – аналітичний розв’язок; 2 – розрахунок, КПЗ; 3 – розрахунок, OpenFOAM

Рис. 3 – Профіль температур у радіальному напрямку циліндра в задачі 2

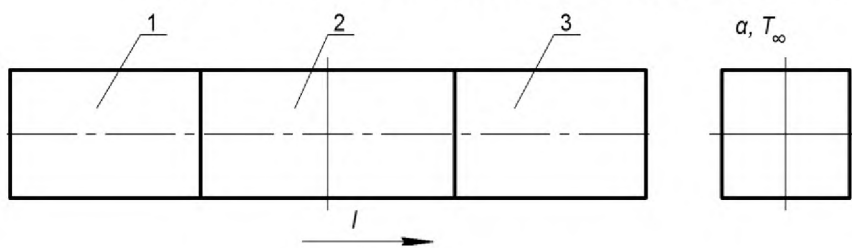


Рис. 4 – Геометрія задачі 3

Межові умови: на зовнішній поверхні зразків – $\alpha = 7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $T_\infty = 300 \text{ К}$; на торцевих поверхнях – адіабатні. Перепад напруги за довжиною системи зразків – 5 В. Дискретизація моделі – структурована сітка з 40000 гексагедронів еквівалентного розміру.

Відповідна система диференціальних рівнянь [7] та її інтерпретація в OpenFOAM:

$$\begin{cases} \nabla[\sigma(T)\nabla U] = 0 \\ c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T)\nabla T] + \sigma(T)|\nabla U|^2 \end{cases} \quad (5)$$

де U – електричний потенціал, В; σ – електропровідність, $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$.

```

solve
(
    fvm::laplacian(Ro, Vel)
);
solve
(
    fvm::ddt(cp*rho, T)
    == fvm::laplacian(lambda, T)
    + Ro*(fvc::grad(Vel) & fvc::grad(Vel))
);
    
```

Модель (5), записана у вигляді (6), реалізована в новому коді electroThermFoam, що є модифікованою версією chtMultiRegionFoam. Для його апробації розв’язували тестову задачу стаціонарного електричного нагрівання і порівнювали її розв’язки з результатами, отриманими за допомогою КПЗ (табл. 3 і рис. 5).

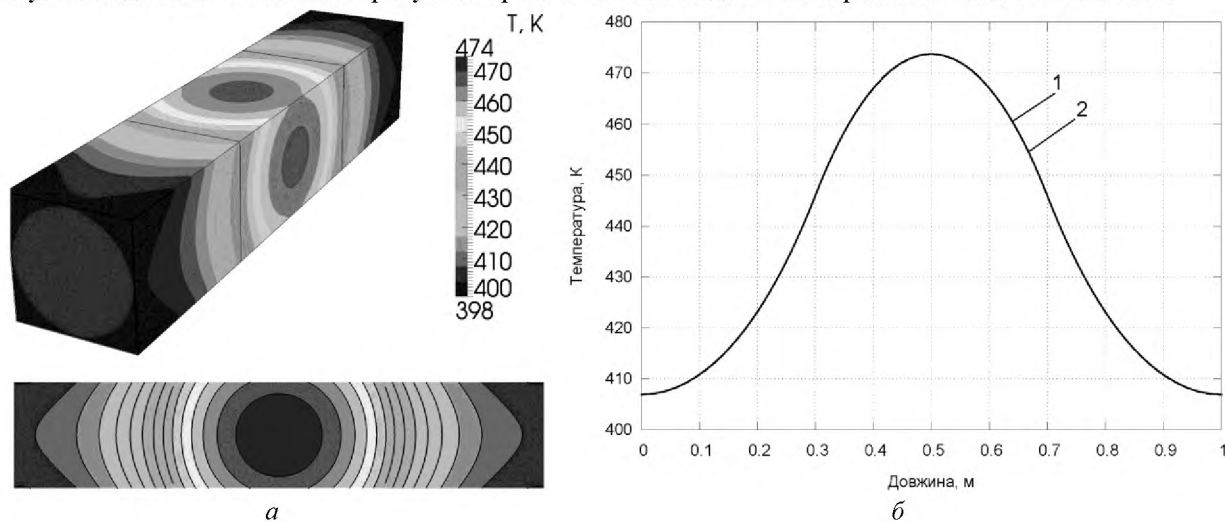
Аналіз результатів. Для задач теплопровідності (задача 1) КПЗ і OpenFOAM показали майже ідентичні результати (відхилення від точного розв’язку за температур понад 1000 К – у межах 0,01 %).

Для задачі теплопровідності в нескінченному циліндрі з внутрішнім джерелом теплоти (задача 2), OpenFOAM показав близький до точного розв’язку розподіл поля температур. При цьому результати числового аналізу в КПЗ та OpenFOAM були меншими, аніж теоретичні.

Таблиця 4 – Розв’язки задачі 3

Параметри	Розв’язок системи (5)		
	розрахунковий, КПЗ	розрахунковий, OpenFOAM	аналітичний
Температура, К			
середня за об’ємом елемента 1	416,02	415,96	
максимальна елемента 1	444,55	445,95	
мінімальна елемента 1	398,96	398,46	
середня за об’ємом елемента 2	460,22	460,16	
максимальна елемента 2	473,74	473,68	
мінімальна елемента 2	436,53	435,11	
середня за об’ємом елемента 3	416,03	415,96	
максимальна елемента 3	444,56	445,95	
мінімальна елемента 3	398,96	398,46	
Потужність джерела теплоти, Вт			
в елементах 1 і 3	8264,32	8264,46	8264,46
в елементі 2	33057,76	33057,85	33057,85
Сумарна електрична потужність, Вт			
	145,45	145,45	145,46
Сила струму, А			
	727,27	727,27	727,27

Електрична частина задачі 3 добре корелює з точним розв’язком. При цьому результати теплових розрахунків за допомогою нового вирішувача OpenFOAM майже ідентичні отриманим за допомогою КПЗ.



а – поля температур; б – профіль температур уздовж центральної осі зразків: 1 – КПЗ; 2 – OpenFOAM

Рис. 5 – Результати розрахунків поля температур задачі 3

Висновки. Відносна похибка моделювання температурних полів термічних та електротермічних задач за допомогою OpenFOAM не перевищує 2 % за мінімальними/максимальними значеннями і менше 1 % за значеннями, усередненими за об’ємом. Це підтверджує можливість застосування відкритого програмного коду OpenFOAM у розв’язанні задач теплоелектричного стану твердих тіл.

Перспективи подальших досліджень. У подальших планах – модернізація коду electroThermFoam для нелінійних задач з урахуванням заданого режиму введення електричної потужності в систему і створення нового вирішувача для моделювання теплоелектричного стану агрегатів для термічного оброблення сипких матеріалів.

Список використаної літератури

1. OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.openfoam.org> (дата звернення 01.05.13).

2. OpenFOAM. User Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/UserGuide.pdf> (дата звернення 01.05.13).
3. Физические величины : справочник / под ред. И. С. Григорьева. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
4. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.
5. Han J.-C. Analytical Heat Transfer / Je-Chin Han. – CRC Press, 2012. – 326 p.
6. OpenFOAM. Programmer's Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/ProgrammersGuide.pdf> (дата звернення 01.05.13).
7. Карвацький А. Я. Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів / А. Я. Карвацький, Є. М. Панов, С. В. Кутузов та ін. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 352 с.

Надійшла до редакції 23.01.2013.

Lazariev T. V.

SIMULATION OF THERMOELECTRIC STATE BY MEANS OF OpenFOAM

Modern requirements for development and modernization of equipment and processes are speed, accuracy, minimum costs. Usage of numerical simulation with latest achievements in computer hardware and software can provide these requirements at the appropriate level. Numerical modeling allows one to quickly analyze new solutions and find the most effective ones. Also it can be apply for finding optimal value of input parameters or best process conditions. Computational simulation allows one to look deeper into physical phenomena or technological processes. And it can determine the values that are difficult or impossible measured with experiment. Nowadays computer simulation has become a useful part of modeling many natural systems in physics, chemistry and biology as well as in engineering to gain insight into the operation of those systems. A lot of different softwares are used for purpose of numerical modeling. OpenFOAM is a good example of this class of software.

OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) is a C++ toolbox for the development of customized numerical solvers, and pre-/post-processing utilities for the solution of continuum mechanics problems, including computational fluid dynamics (CFD). The code is released as free and open source software under the GNU General Public License.

In this article, OpenFOAM is evaluated with regard to its suitability for the simulation of nonlinear heat conduction with and without heat source. In addition modified solver for modeling of electric heating of solid materials is presented.

To validate OpenFOAM test cases were set up and the results were compared with commercial software that has similar computational capabilities and with theoretical data. Test cases: steady-state nonlinear heat conduction in multilayer plane wall; steady-state heat conduction with heat source in two cylinders in contact; Joule heating of 3 square rods with different thermal and electric properties.

The results obtained from OpenFOAM were in good agreement (near 1 %) with both numerical and analytical solutions.

Keywords: OpenFOAM, numerical modeling, thermoelectric state, Joule heating.

References

1. OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. – <http://www.openfoam.org>.
2. OpenFOAM. User Guide. – <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/UserGuide.pdf>.
3. Fizicheskie velichiny [Physical sizes : reference book] / pod red. I. S. Grigor'va. – М. : Jenergoatomizdat, 1991. – 1232 s.
4. Isachenko V. P. Teploperedacha [Heat transfer] / V. P. Isachenko, V. A. Osipova, A. S. Sukomel – М. : Jenergija, 1975. – 488 s.
5. Han J.-C. Analytical Heat Transfer / Je-Chin Han – CRC Press, 2012. – 326 p.
6. OpenFOAM. Programmer's Guide. – <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/ProgrammersGuide.pdf>.
7. Karvatskyi A. Ya. Teoretychni ta eksperymentalni doslidzhennia teploelektrychnoho ta mekhanichnoho stanu vysokotemperaturnykh ahrehativ [Theoretical and experimental researches of thermoelectric and mechanical state of high temperature aggregates] / A. Ya. Karvatskyi, Ye. M. Panov, S. V. Kutuzov ta in. – К. : NTUU «КПІ», 2012. – 352 s.