

УДК 004.9:536

DOI: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-13>

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ТА ГІДРОДИНАМІКИ ПЕРЕБІГУ РІДИН У ТРУБАХ

Свинчук О. В., к.ф.-м.н., доц., Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-1715-0761>, 7011990@ukr.net

Клименко Я. В., аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. yaroslav.klymenko98@gmail.com

Анотація. У статті проведено детальний аналіз основних програмних інструментів, які використовуються для моделювання процесів теплообміну та гідродинаміки в системах із турбінним маслом. Досліджено такі системи, як ANSYS Fluent, SimScale, OpenFOAM, Elmer та COMSOL Multiphysics. Ці інструменти були вибрані через їх популярність та широке використання в інженерних дослідженнях і промислових застосуваннях. Кожна з них була оцінена з погляду її здатності вирішувати завдання, пов'язані з теплом та рухом рідин у складних інженерних застосуваннях, які включають великі обчислювальні моделі й високі вимоги до точності результатів. Аналіз показав, що кожна з програм має свої сильні боки, а також значні недоліки, які можуть обмежувати їх використання в певних умовах. Окрім того, існують важливі технічні виклики, які потребують уваги під час розроблення майбутніх версій програмного забезпечення. Наприклад, підвищення масштабованості обчислень для великомасштабних моделювань, які стають дедалі більш важливими у багатьох галузях, включаючи енергетику. Пропонується низка рекомендацій щодо вибору найкращого програмного забезпечення залежно від специфічних потреб проєкту, а також визначає ключові напрями для розвитку майбутнього програмного забезпечення, що могло б поліпшити існуючі рішення за ефективністю, вартістю та користувацькою зручністю. Розглядаються також потенційні інноваційні технології, такі як штучний інтелект і машинне навчання, які можуть бути інтегровані в нові системи для поліпшення їх функціональності та автоматизації процесів розроблення. Метою роботи є підвищення обізнаності про сучасні можливості й обмеження програмного забезпечення для моделювання та сприяння розвитку нових підходів і технологій, які можуть значно покращити процеси проєктування і дослідження в інженерії.

Ключові слова: програмне забезпечення, моделювання, теплообмін, гідродинаміка, рівняння теплопередачі, інноваційні технології, хмарні обчислення.

ANALYSIS OF MODERN MEANS OF SIMULATION OF HEAT EXCHANGE PROCESSES AND HYDRODYNAMICS OF FLUID FLOW IN PIPES

Olha Svynchuk, Candidate of Physics Mathematics, Associate Professor of the Department of Software Engineering in Energy, The National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0003-1715-0761>, 7011990@ukr.net

Yaroslav Klymenko, PhD, The National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine. yaroslav.klymenko98@gmail.com

Abstract. The article provides a detailed analysis of the main software tools used to model heat transfer and hydrodynamics in turbine oil systems. The following systems have been studied as ANSYS Fluent, SimScale, OpenFOAM, Elmer, and COMSOL Multiphysics were investigated. These tools were chosen because of their popularity and widespread use in engineering research and industrial applications. Each of the systems was evaluated in terms of its ability to solve problems related to heat and fluid motion in complex engineering applications that involve large computational models and high demands on the accuracy of the results. The analysis showed that each of the programs has its strengths and also has significant disadvantages that may limit their use in certain conditions. In addition, there are important technical challenges that require attention in the development of future versions of the software. For example, increasing the scalability of calculations for large-scale simulations, which are becoming increasingly important in many industries, including energy. This article offers a number of recommendations for choosing the most suitable software depending on the specific needs of the project, and also identifies key directions for the development of future software that could surpass existing solutions in terms of efficiency, cost and user-friendliness. Also considered

are potential innovative technologies, such as artificial intelligence and machine learning, which can be integrated into new systems to improve their functionality. This work aims to raise awareness of the capabilities and limitations of modeling software, also to contribute to the development of new approaches and technologies that can significantly improve the design and research processes in engineering.

Key words: software, modeling, heat transfer, hydrodynamics, heat transfer equations, innovative technologies, cloud computing.

Вступ

Моделювання теплообміну та гідродинаміки є фундаментальним елементом для оптимізації інженерних систем, особливо у секторах, де застосовується турбінне мастило в системах трубопроводів. Ці процеси мають вирішальне значення для підвищення ефективності, забезпечення надійності та покращення безпеки обладнання. У цьому контексті важливим завданням є розроблення програмного забезпечення, яке не лише буде відповідати сучасним вимогам, а й буде вдосконалено порівняно з існуючими аналогами за ключовими параметрами ефективності, точності та універсальності застосування.

Проводиться аналіз наявних програмних рішень у сфері моделювання теплообміну та гідродинаміки з акцентом на такі інструменти, як ANSYS Fluent, SimScale, OpenFOAM, Elmer, та COMSOL Multiphysics. Основна увага буде зосереджена на виявленні потенційних векторів для розроблення нового програмного забезпечення, яке могло б задовольнити інженерні потреби краще, ніж існуючі рішення. У процесі аналізу будуть ідентифіковані ключові недоліки сучасних систем та визначені, які функціональні можливості є найбільш критичними для поліпшення.

Розроблення такого роду програмного забезпечення вимагає не лише розуміння нинішніх можливостей існуючих систем, а й високого рівня інноваційного мислення для впровадження нових технологій та підходів, які можуть реалізувати потенціал цієї галузі. Дослідження спрямоване на розроблення рекомендацій, які допоможуть у майбутньому створити більш продуктивне, точне та гнучке програмне забезпечення. Новий продукт має на меті не лише вдосконалити процеси проектування та експлуатації інженерних систем, а й стати взірцем у галузі, установлюючи нові стандарти для наступних поколінь інженерного програмного забезпечення.

Метою дослідження є аналіз спеціального програмного забезпечення для моделювання процесів теплообміну та гідродинаміки перебігу рідин у трубах із подальшими рекомендаціями для розроблення нового програмного продукту.

Виконання досліджень

Аналіз останніх досліджень та публікацій показав, що нині існує вже багато програмних продуктів, які користуються популярністю під час моделювання процесів теплообміну та гідродинаміки за перебігу рідини всередину труб. Розглянемо деякі з них.

ANSYS Fluent є одним із провідних інструментів у сфері моделювання динаміки рідин і теплообміну [1]. Завдяки можливостям деталізованого моделювання та оптимізації програма Fluent є незамінним інструментом для інженерів-дослідників, даючи їм змогу виконувати складні обчислення для різноманітних інженерних задач. Цей програмний продукт дає змогу виконувати комплексні обчислення потоків, що включають ламінарні, турбулентні, нерівноважні багатофазні потоки, а також розрахунки згоряння і радіації. Завдяки вбудованій технології масштабування Fluent може використовуватися для задач, які вимагають значних обчислювальних ресурсів, включаючи великі промислові аплікації. Наведемо деякі застосування. У статті [2] описується комп'ютерне моделювання руху повітря в каналі насадки з використанням пакету ANSYS FLUENT. У статті [3] досліджено вплив якості моделювання пограничного шару під час виконання CFD-розрахунку аеродинамічних характеристик літального апарата замкненої схеми в середовищі ANSYS FLUENT. Статтю [4] присвячено розробленню методики побудови журналу команд для моделювання теплофізичного стану експериментальних пристроїв у реакторних експериментах, що дають змогу керувати командою для збереження розв'язувача програми ANSYS FLUENT як коду в окремому файлі. У статті [5] розроблено та описано код на основі Python для автоматизації повторюваних обчислень у CFD-моделюванні.

SimScale є хмарною платформою для інженерного моделювання, яка пропонує інструменти для CFD-аналізу, структурного аналізу та термодинаміки [7]. Надає інженерам можливість: динаміку рідини, структурну механіку, термодинаміку, електромагнетизм та мультифізичний аналіз у хмарі. Основною перевагою SimScale є її доступність через веббраузер без необхідності інсталяції дорогих ліцензій на локальні машини. Ця платформа забезпечує колаборацію в реальному часі, що дає змогу командам інженерів ефективно співпрацювати над складними проектами. Програмне забезпечення знаходить застосування в широкому спектрі галузей промисловості: вітроенергетиці, автомобільній промисловості, аерокосмічній галузі, електроніці, промислому устаткуванні та ін. У статті [7] досліджується ефективність використання різних охолоджувачів на літій-іонних елементах 18650 із застосуванням сполученого моделювання

теплопередачі за допомогою SimScale. У статті [8] автори розробляють динаміку та систему керування для безпілотної парашутної системи, і для оцінки аеродинамічних коефіцієнтів використовується симуляція обчислювальної гідродинаміки CFD із використанням SimScale.

Для вирішення завдань обчислювальної гідроаеродинаміки на мові C++ розроблений пакет OpenFOAM, який використовує об'єктно-орієнтовані методи програмування [9]. OpenFOAM – це один із найбільш відомих відкритих інструментів для CFD-моделювання. Його особливістю є високий ступінь налаштування й адаптивності, даючи змогу користувачам самостійно розробляти нові моделі та розширювати функціональність. OpenFOAM надає могутні можливості для розв'язання широкого спектру інженерних задач – від моделювання складних потоків рідини, що включають хімічні реакції, турбулентність і теплообмін, до акустики, механіки твердого тіла та електромагнетизму. Програмне забезпечення включає як готові модулі рішення широкого кола завдань механіки суцільного середовища, так і дає змогу розробляти власні моделі під різні завдання. У статті [10] для аналізу теплового режиму та розроблення конструкції тепловідводу теплонавантажуваного світлодіодного освітлювача синтезовано структуру вирішувача задачі, яка основана на структурі базового вирішувача laplacianFoam та функціях бібліотеки swak4foam системи математичного моделювання OpenFOAM. У статті [11] описано чисельне моделювання просторового потоку високонапірної радіально-осьової гідротурбіни PO 310 для двох варіантів проточної частини з використанням пакета прикладних програм OpenFOAM. У роботі [12] проведено дослідження кавітаційних характеристик високонапірної радіально-осьової гідротурбіни за допомогою OpenFOAM. У роботі [13] представлено бібліотеку SparseLinSol для розв'язування великих розрізаних систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Обговорюються попередні результати об'єднання розробленої бібліотеки з пакетом OpenFOAM для прискорення завдань гідродинамічного моделювання.

Elmer – це програмне забезпечення для мультифізичного моделювання з відкритим кодом, включає фізичні моделі гідродинаміки, електромагнетизму, теплопередачі та акустики, які описуються диференціальними рівняннями, у частинних похідних розв'язуються методом кінцевих елементів [14]. Elmer особливо підходить для комплексних наукових досліджень, що вимагають детального моделювання взаємодій між різними фізичними процесами. У статті [15] досліджується перевірка конструкції плазмової техніки за допомогою Elmer, яка представлена як доступний інструмент, який може допомогти моделювати багатофізичні процеси та перевіряти пристрої генерації плазми. У статті [16] описується програмне забезпечення EOF-Library, яке поєднує пакети моделювання Elmer і OpenFOAM, що забезпечує ефективну інтерполяцію внутрішнього поля та зв'язок між рамками кінцевого елемента та кінцевого об'єму.

COMSOL Multiphysics – це універсальний інструмент для моделювання, який дає змогу вирішувати майже будь-які науково-технічні завдання [17]. Ця система особливо відома своїми можливостями мультифізичного моделювання, здатністю легко моделювати різні фізичні процеси в єдиному інтерфейсі. COMSOL також має бібліотеку застосунків, яка дає змогу користувачам створювати спеціалізовані рішення для специфічних задач і надавати їх кінцевим користувачам як інтерактивні програми. Середовище розроблення програм дає змогу доповнювати програми інтерфейсами на основі власних моделей. Це потужне інтерактивне середовище для моделювання та розрахунків більшості наукових та інженерних задач, основаних на диференціальних рівняннях із частковими похідними PDE, методом кінцевих елементів. У статті [18] представлені результати роботи стосуються холодильної установки рефрижераторного контейнера і спрямовані на розв'язання задачі конвективного теплообміну навколо трубчатого випарника з вентилятором примусового обдування, які розташовані в металевому кожусі. У статті [19] описано фізичну модель проникного термоелемента з розвиненою поверхнею теплообміну для охолодження потоку повітря за допомогою комп'ютерного модулювання у програмному пакеті COMSOL Multiphysics. У статті [20] представлено моделювання обчислювальної гідродинаміки для вивчення гідротермальної карбонізації кісточки авокадо (AS) у реакторі з періодичним перемішуванням за допомогою системи керування з відкритим контуром, яке було виконано в COMSOL Multiphysics 5.2.

Отже, дані програмні продукти різняться за своїм функціоналом, доступністю, масштабом і здатністю до кастомізації. Детальний аналіз кожного з них допоможе зрозуміти, які аспекти необхідно покращити у новому програмному забезпеченні з акцентом на перевищення існуючих аналогів за ключовими параметрами.

Для дослідження турбулентних та теплових процесів у трубопроводах використовуються фундаментальні рівняння рідинної динаміки та теплообміну.

Рівняння Нав'є – Стокса для нестисливих рідин:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \nabla) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}, \quad (1)$$

де $\vec{u}$ – вектор швидкості рідини, t – час, p – тиск, ν – кінематична в'язкість, $\vec{f}$ – вектор масових сил.

Рівняння Нав'є – Стокса дає змогу моделювати складні течії, включаючи турбулентність, вплив температури, в'язкості, тиску та інших чинників на поведінку рідини. Рівняння є нелінійними та часто важко розв'язуваними аналітично, особливо для складних геометрій або турбулентних течій. Тому велике значення мають чисельні методи та комп'ютерне моделювання. Ці теоретичні основи є критично важливими для розуміння і моделювання поведінки турбінного мастила в трубах, що забезпечує точність, надійність та ефективність у проектуванні та експлуатації турбінних систем.

Рівняння енергії:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T = \pm \nabla^2 T + \Phi, \quad (2)$$

де T – температура рідини, α – температурна дифузність, Φ – генерація або поглинання.

Рівняння турбулентної кінетичної енергії k та швидкості дисипації ε :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla k = P_k - \varepsilon + \nabla \cdot ((\nu + \sigma_k \nu_t) \nabla k), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \varepsilon = \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) + \nabla \cdot ((\nu + \sigma_\varepsilon \nu_t) \nabla \varepsilon), \quad (4)$$

де P_k – вироблення турбулентної кінетичної енергії, ν_t – турбулентна в'язкість, σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ – константами моделі, $\vec{u}$ – вектор миттєвої швидкості рідини, T – миттєва температура, k – турбулентна кінетична енергія, ε – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії.

Рівняння неперервності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (5)$$

де ρ – щільність, $\vec{u}$ – вектор швидкості.

Дані рівняння є основою для більшості CFD (обчислювальна гідродинаміка) програм і застосовуються для різноманітних інженерних завдань – від аеродинамічного моделювання до вирішення проблем теплообміну в енергетичних системах. Основні переваги та недоліки даних програм представлено в табл. 1.

Таблиця 1
Переваги та недоліки основних CFD-систем

Програмне забезпечення	Переваги	Недоліки
ANSYS Fluent	1) Висока точність моделювання складних фізичних процесів. 2) Широкий набір можливостей для моделювання турбулентності, теплообміну та хімічних реакцій. 3) Потужна підтримка паралельних обчислень для обробки великих датасетів.	1) Висока вартість ліцензій та потреба в значних обчислювальних ресурсах. 2) Складність налаштування моделей та висока крива навчання.
SimScale	1) Хмарна платформа, доступна з будь-якого місця. 2) Не вимагає інвестицій в апаратне забезпечення. 3) Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і спрощена колаборація.	1) Обмеження на доступність ресурсів залежно від тарифного плану. 2) Менша контрольованість і гнучкість порівняно з десктопними аплікаціями.
OpenFOAM	1) Відкрите програмне забезпечення з можливістю кастомізації. 2) Потужні засоби для розв'язання складних інженерних завдань. 3) Велика спільнота користувачів та розробників.	1) Складність використання та необхідність глибоких технічних знань. 2) Відсутність офіційної технічної підтримки.
Elmer	1) Багатофункціональне мультифізичне моделювання. 2) Відкритий код, що дозволяє адаптацію під специфічні потреби. 3) Немає вартості ліцензії.	1) Обмежені ресурси для великих або промислових масштабних завдань. 2) Потребує значних зусиль для налаштування та інтеграції з іншими системами.
COMSOL Multiphysics	1) Широкі можливості для мультифізичного моделювання. 2) Велика кількість готових модулів для різних застосувань. 3) Інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс користувача.	1) Висока вартість ліцензії. 2) Може вимагати значних обчислювальних ресурсів для складних моделей.

Рекомендації для розроблення нового програмного забезпечення

На основі вищезазначеного аналізу нове програмне забезпечення повинно врахувати такі аспекти:

- масштабованість та доступність: інтеграція хмарних технологій для забезпечення легкого доступу та масштабованості без великих витрат на апаратне забезпечення;
- інтуїтивність та простота використання: розроблення зрозумілого інтерфейсу, який знижує криву навчання і робить інструмент доступним широкому колу інженерів;
- гнучкість та кастомізація: надання можливостей для адаптації інструменту під специфічні потреби користувача, зберігаючи при цьому високу точність і ефективність обчислень;
- економічна доступність: пропозиція конкурентоспроможної вартості з можливістю масштабування функціоналу згідно з потребами користувача.

Із цими керівними принципами новий інструмент зможе не лише конкурувати з існуючими рішеннями, а й установити нові стандарти в індустрії інженерного моделювання.

Висновки

Проведено детальний аналіз сучасних програмних засобів для моделювання процесів теплообміну та гідродинаміки з використанням турбінного масла в системах трубопроводів. Огляд включав такі інструменти, як ANSYS Fluent, SimScale, OpenFOAM, Elmer та COMSOL Multiphysics, кожен з яких має свої унікальні переваги та обмеження. Кожна із цих систем має потенціал для вирішення складних інженерних завдань, проте існує низка спільних викликів, таких як висока вартість ліцензій, складність управління ресурсами та потреба в значних обчислювальних потужностях.

Виходячи з проведеного аналізу, визначено ключові напрями для розроблення нового програмного забезпечення, яке змогло б конкурувати з існуючими рішеннями. Новий програмний продукт повинен бути більш економічно доступним, інтуїтивно зрозумілим та гнучким у використанні. Це дасть змогу зробити високоякісне інженерне моделювання доступним для ширшого кола фахівців та забезпечити ефективнішу кооперацію у командних проєктах. Завдання розроблення такого програмного забезпечення вимагатиме інтеграції передових технологій, таких як хмарні обчислення, штучний інтелект, для оптимізації моделювання та забезпечення високої точності обчислень. Також критично важливою буде підтримка спільноти користувачів та розробників через відкриту архітектуру та можливість кастомізації інструменту.

Подальші дослідження будуть спрямовані на тестування й валідацію нової системи в реальних умовах, щоб забезпечити її надійність та ефективність. Такий підхід не лише сприятиме інноваційному розвитку інженерних дисциплін, а й забезпечить більшу адаптивність та стійкість виробничих процесів.

Література

1. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. Engineering Analysis with ANSYS Software. Butterworth-Heinemann, 2nd Edition, 2018. 562 p.
2. Кузьменко І.М. Комп'ютерне моделювання руху повітря по каналу насадки з використанням пакету ANSYS FLUENT. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія «Технічні науки»*. 2014. № 11. С. 72–78.
3. Хомінич О.О. Дослідження якості моделювання пограничного шару при виконанні CFD-розрахунку аеродинамічних характеристик літального апарата замкненої схеми в середовищі ANSYS FLUENT. *Прилади та методи контролю*. 2016. № 31. С. 65–74. <https://doi.org/10.20535/0203-377131201686969>
4. Kabylyakov Ye.A., Surayev A., Irkimbekov R.A. Application of the text interface of the ANSYS FLUENT program for simulation of the thermophysical state of a typical experimental device. *NNC RK Bulletin*. 2022. № 3. P. 55–63. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-55-63>
5. Papkov V., Shadymov N., Pashchenko D. CFD-modeling of fluid flow in ANSYS FLUENT using Python-based code for automation of repeating calculations. *International Journal of Modern Physics*. Vol. 34, no. 9. 2023. 2350114. <https://doi.org/10.1142/s0129183123501140>
6. Simscale. <https://www.simscale.com/>
7. Sharma M.S., Jayagopal A., Ramesha D.K., Murali K., Tiwari P. Exploring the efficacy of using various coolants on lithium-ion 18650 cell employing conjugate heat transfer simulation. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 20, part 2. P. 222–227. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.221>
8. Fiedler B., Redkar S. Control design and simulation framework for an autonomous paramotor UAV. *ASME 2022 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, IDETC-CIE 2022. Vol. 7. V007T07A059. <https://doi.org/10.1115/DETC2022-91283>
9. OpenFOAM. The open source CFD toolbox. <http://www.openfoam.com>
10. Собіян І.В., Трофимов В.Е. Синтез структури вирішувача системи математичного моделювання OpenFOAM для аналізу теплового режиму світлодіодного світильника. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*. 2019. № 5–6. С. 25–33. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2019.5-6.25>
11. Крупа Є.С., Дмитрієнко О.В., Тиньянова І.І., Недовесов В.О. Прогнозування енергетичних характеристик високонапірної радіально-осьової гідротурбіни з використанням програмного комплексу CFD. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія «Гідравлічні машини та гідроагрегати». 2020. № 1. С. 102–110. <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2020.1.14>
12. Zhang H., Zhang L. Numerical simulation of cavitating turbulent flow in a high head Francis turbine at part load operation with OpenFOAM. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 31. P. 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1006>

13. Krasnopolsky B., Medvedev A. Acceleration of large scale OpenFOAM simulations on distributed systems with multicore cpus and gpus. *Parallel Computing: On the Road to Exascale. Series: Advances in Parallel Computing. Amsterdam: IOS Press.* 2016. Vol. 27. P. 93–102. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-621-7-93>
14. Elmer FEM: open source multiphysical simulation software. <http://www.elmerfem.org> (дата звернення: 06.05.2024).
15. Bondarenko D., Gabbar H.A., Barry Stoute C.A. Engineering design of plasma generation devices using Elmer finite element simulation methods. *Engineering Science and Technology, an International Journal.* Vol. 20, no. 1. 2017. Pp. 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.015>
16. Vencels J., Råback P., Geža V. EOF-Library: Open-source Elmer FEM and OpenFOAM coupler for electromagnetics and fluid dynamics. *SoftwareX.* Vol. 9. 2019. P. 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.01.007>
17. Comsol. <https://www.comsol.com/> (дата звернення: 06.05.2024).
18. Байдак Ю.В., Смик В.А. Моделювання задачі конвективного теплообміну з поверхні випарника холодильної установки рефрижераторного контейнера. *Refrigeration Engineering and Technology.* 2016. Т. 52. № 1. С. 5–11. <https://doi.org/10.21691/ret.v52i1.31>
19. Черкез Р.Г., Семешкін В.А., Жукова А.С., Стефук В.В. Вплив висоти пластин на ефективність проникного термoelementa в режимі охолодження. *Фізика і хімія твердого тіла.* 2023. Т. 24. № 2. С. 385–391. <https://doi.org/10.15330/pccs.24.2.385-391>
20. Sangare D., Bostyn S., Moscova-Santillan M., Gökalp I. Hydrodynamics, heat transfer and kinetics reaction of CFD modeling of a batch stirred reactor under hydrothermal carbonization conditions. *Energy.* 2021. Vol. 219. 119635. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119635>

References

1. Stolarski, T., Nakasone, Y., & Yoshimoto, S. (2018). *Engineering Analysis with ANSYS Software.* Butterworth-Heinemann, 2nd Edition, 2018.
2. Kuzjmenko, I.M. (2014). Комп'ютерне моделювання руху повітря по каналу насадки з використанням пакету ANSYS FLUENT [Computer modeling of air movement through the nozzle channel using the ANSYS FLUENT package]. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки, Збірник наукових праць, Кам'янець-Подільський*, 11, 72–78 [in Ukrainian].
3. Khomynych, O.O. (2016). Doslidzhennja yakosti modeljuvannja pohranychnogho sharu pry vykonanni CFD-rozrakhunku aerodynamichnykh kharakterystyk litalnogho aparata zamkненої skhemy v seredovyshti ANSYS FLUENT [Study of the quality of boundary layer modeling when performing CFD calculation of the aerodynamic characteristics of a closed circuit aircraft in the ANSYS FLUENT environment]. *Пряльди та методи контролю*, 31, 65–74 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/0203-377131201686969>
4. Kabdylkakov, Ye.A., Surayev, A., & Irkimbekov R.A. (2022). Application of the text interface of the ANSYS FLUENT program for simulation of the thermophysical state of a typical experimental device. *NNC RK Bulletin*, 3, 55–63. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-55-63>
5. Papkov, V., Shadymov, N., & Pashchenko, D. (2023). CFD-modeling of fluid flow in ANSYS FLUENT using Python-based code for automation of repeating calculations. *International Journal of Modern Physics*, 34 (9), 2350114. <https://doi.org/10.1142/s0129183123501140>
6. Simscale. <https://www.simscale.com/> (data zvernennja 06.05.2024)
7. Sharma, M.S., Jayagopal, A., Ramesha, D.K., Murali, K., & Tiwari, P. (2020). Exploring the efficacy of using various coolants on lithium-ion 18650 cell employing conjugate heat transfer simulation. *Materials Today: Proceedings*, 20 (2), 222–227. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.221>
8. Fiedler, B., & Redkar, S. Control design and simulation framework for an autonomous paramotor UAV. *ASME 2022 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 7, V007T07A059. <https://doi.org/10.1115/DETC2022-91283>
9. OpenFOAM. The open source CFD toolbox. <http://www.openfoam.com> (data zvernennja 06.05.2024).
10. Sobijan, I.V., & Trofymov, V.E. (2019). Syntez struktury vyrishuvacha systemy matematychnogho modeljuvannja OpenFOAM dlja analiza teplovogho rezhymu svitlodiodnogho svityllynika [Synthesis of the solver structure of the OpenFOAM mathematical modeling system for the analysis of the thermal mode of the LED lamp]. *Tekhnologhija i konstruiuvannja v elektronnij aparaturi*, 5–6, 25–33 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15222/TKEA2019.5-6.25>
11. Krupa, Je.S., Dmytrijenko, O.V., Tynjanova, I.I., & Nedovjesov, V.O. (2020). Proghnozuvannja energhetichnykh kharakterystyk vysokonapirnoji radialjno-osjovoji ghidroturbiny z vykorystannjam proghramnogho kompleksu CFD [Prediction of energy characteristics of a high-pressure radial-axial hydroturbine using the CFD software complex]. *Visnyk Nacionalnogho tekhnichnogho universytetu «KhPI».* Serija: Ghidravlichni mashyny ta ghidroagheghaty, 1, 102–110 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2020.1.14>
12. Zhang, H., & Zhang, L. (2012). Numerical simulation of cavitating turbulent flow in a high head Francis turbine at part load operation with OpenFOAM. *Procedia Engineering*, 31, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1006>
13. Krasnopolsky, B., & Medvedev, A. (2016). Acceleration of large scale OpenFOAM simulations on distributed systems with multicore cpus and gpus. *Parallel Computing: On the Road to Exascale. Series: Advances in Parallel Computing. Amsterdam: IOS Press*, 27, 93–102. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-621-7-93>
14. Elmer FEM: open source multiphysical simulation software. <http://www.elmerfem.org> (data zvernennja 06.05.2024).
15. Bondarenko, D., Gabbar, H.A., & Barry Stoute, C.A. (2017). Engineering design of plasma generation devices using Elmer finite element simulation methods. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20 (1), 160–167. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.015>
16. Vencels, J., Råback, P., & Geža, V. (2019). EOF-Library: Open-source Elmer FEM and OpenFOAM coupler for electromagnetics and fluid dynamics. *SoftwareX*, 9, 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.01.007>
17. Comsol. <https://www.comsol.com/> (data zvernennja 06.05.2024)
18. Bajdak, Ju.V., & Smyk, V.A. (2016). Modeljuvannja zadachi konvektyvnogho teploobminu z poverkhni vypar-nyka kholodylnoj ustanovky refryzheratornogho kontejnera [Modeling of the problem of convective heat transfer from the surface

of the evaporator of the refrigerating unit of the refrigerated container]. *Refrigeration Engineering and Technology*, 52 (1), 5–11 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.21691/ret.v52i1.31>

19. Cherkez, R.Gh., Semeshkin, V.A., Zhukova, A.S., & Stefjuk, V.V. (2023). Vplyv vysoty plastyn na efektyvnistj pronyknogho termoelementa v rezhyimi okholodzhennja [The influence of the height of the plates on the efficiency of the penetrating thermocouple in the cooling mode]. *Fizyka i khimija tverdogho tila*, 24 (2), 385–391 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15330/pcss.24.2.385-391>

20. Sangare, D., Bostyn, S., Moscota-Santillan, M., & Gökalp, I. (2021). Hydrodynamics, heat transfer and kinetics reaction of CFD modeling of a batch stirred reactor under hydrothermal carbonization conditions. *Energy*, 219, 119635. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119635>