

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ В СУЦІЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з навчальної дисципліни  
«Моделювання фізичних процесів» для студентів, які навчаються за спеціальністю  
105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2020

**Комп'ютерне моделювання процесів переносу в суцільному середовищі:**  
Методичні вказівки до виконання курсової роботи з навчальної дисципліни «Моделювання фізичних процесів» для студентів, які навчаються за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Н. Ф. Дмитрієва. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,43 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 25 с.

*Ухвалено на засіданні кафедри фізики енергетичних систем  
КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 13/2020 від 22.04.2020 р.).*

*Ухвалено Методичною радою Фізико-технічного інституту  
КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №4/2020 від 27.04.2020 р.).*

Електронне мережне видання

## **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ В СУЦІЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з навчальної дисципліни  
«Моделювання фізичних процесів» для студентів, які навчаються за спеціальністю  
105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Укладач *Димитрієва Наталія Федорівна*, канд. фіз.-мат. наук

Відповідальний  
за випуск *Литвинова Т. В.*, канд. техн. наук, доц.

Рецензенти: *Кондаков В. О.*, канд. фіз.-мат. наук

Методичні вказівки призначені для студентів, які навчаються за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». Розглянуто зміст, основні складові та порядок виконання курсової роботи з дисципліни «Моделювання фізичних процесів». Рекомендації навчають структурувати й формалізувати в термінах модельного представлення широкого класу задач гідрогазодинаміки, процесів тепло- та масообміну та їхньої чисельної реалізації у відкритих та комерційних пакетах прикладних програм.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

## ЗМІСТ

Передмова . . . . .	4
Завдання до курсової роботи . . . . .	5
Рекомендоване програмне забезпечення . . . . .	7
Вимоги до оформлення . . . . .	8
Рекомендації до виконання розділів курсової роботи: . . . . .	10
1    Постановка задачі . . . . .	10
2    Математичне моделювання . . . . .	11
2.1    Система визначальних рівнянь . . . . .	11
2.2    Граничні умови. . . . .	11
2.3    Масштабний аналіз . . . . .	11
3.    Чисельне моделювання . . . . .	12
3.1    Підготовка вихідних даних . . . . .	12
3.1.1    Геометрія розрахункової області . . . . .	12
3.1.2    Розрахункова сітка . . . . .	13
3.2    Чисельна модель . . . . .	13
3.2.1    Схеми дискретизації системи визначальних рівнянь . . . . .	14
3.2.2    Процедура сумісної корекції полів швидкості та тиску . . . . .	14
3.2.3    Методи розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь . . . . .	15
3.3    Розрахунковий експеримент . . . . .	16
4    Результати розрахунку . . . . .	17
Висновки . . . . .	22
Рекомендована література . . . . .	23
Додаток А . . . . .	25

## ПЕРЕДМОВА

Дана курсова робота є завершальним етапом вивчення дисципліни «Моделювання фізичних процесів» студентами, які навчаються за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». Відповідно до навчального плану дисципліни курсова робота виконується на 4-му курсі, тобто, фактично, супроводжує процес підготовки бакалаврських дипломних робіт. Написання курсової роботи є важливим етапом у підготовці до виконання бакалаврської дипломної роботи та магістерської дисертації майбутнього фахівця прикладного спрямування в галузі фізики енергетичних систем.

Метою курсової роботи є формування у студентів професійних навичок з основ застосування сучасних комп'ютерних обчислювальних технологій у сфері прикладної діяльності, що пов'язана з фізикою суцільного середовища і енергетичних систем в широкому класі режимів процесів та геометричних конструкцій об'єктів, що вивчаються.

У процесі виконання курсової роботи студент повинен продемонструвати вміння самостійно працювати і застосовувати на практиці теоретичні та практичні знання, здобуті під час вивчення дисципліни.

## ЗАВДАННЯ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ

Тематика курсової роботи побудована у відповідності до програми навчальної дисципліни «Моделювання фізичних процесів» та обумовлена її найбільш актуальними теоретичними розділами для спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». Зокрема, комп'ютерне моделювання стаціонарних та нестаціонарних задач промислової гідрогазодинаміки, процесів тепло- та масообміну при ламінарному і турбулентному режимах.

Студент може самостійно обрати тему курсової роботи з нижче представленого списку або запропонувати свою. Також вітається виконання курсової роботи за темою, що пов'язана з бакалаврською дипломною роботою.

Орієнтовний перелік тем:

- Моделювання поверхневої течії вздовж площини.
- Моделювання нестаціонарного обтікання круглого циліндру.
- Моделювання плоскої течії в житловому кварталі при різних режимах.
- Моделювання нестаціонарної течії нестисливого середовища через систему перешкод.
- Моделювання течії в плоскому каналі складної форми при різних режимах.
- Моделювання обтікання тривимірної лопаті вітрогенератора.
- Моделювання нестаціонарної плоскої течії навколо прямокутного тіла.
- Моделювання течії навколо клину при різних режимах.
- Моделювання плоскої течії в каверні при різних режимах.
- Моделювання затопленого струменю в плоскому каналі при різних співвідношеннях швидкостей або температур.
- Моделювання течії в плоскому каналі складної форми з розгалуженням.
- Моделювання течії в плоскому каналі з поворотом при різних режимах.
- Моделювання тривимірного вільного струменю, що витікає зі складної системи у вільний простір.
- Моделювання конвективного теплопереносу у вихровій течії нестисливої рідини.
- Моделювання турбулентної течії в неізотермічному потоці.
- Моделювання процесів горіння складних систем.
- Моделювання двофазної течії в каналі без урахування фазових переходів.
- Моделювання процесу кипіння в замкненому просторі.
- Моделювання конвективного теплопереносу в стисливому середовищі.

Відповідно до обраної теми курсової роботи необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Формулювання математичної моделі явища, що досліджується: система визначальних рівнянь, граничні умови та модель турбулентності за необхідністю.
2. Обґрунтований вибір пакету прикладних програм для розв'язку поставленої задачі, а також відповідної чисельної моделі.
3. Побудова геометрії та розрахункової сітки.
4. Чисельні розрахунки за різних геометричних та динамічних параметрів.
5. Обробка та аналіз отриманих результатів.

Захист курсової роботи є обов'язковим, проводиться з використанням мультимедійного проектора, включає доповідь 5-7 хвилин та обговорення. Оцінюється:

- ступінь володіння матеріалом;
- ступінь обґрунтування вибору математичної моделі поставленої задачі;
- правильність методів чисельного моделювання та організації розрахунків;
- якісний та кількісний аналіз результатів;
- повнота аналізу отриманих результатів розрахунку;
- вміння захищати свою думку.

## РЕКОМЕНДОВАНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Програмне забезпечення для побудови чисельної моделі та проведення розрахунків студент обирає самостійно.

Рекомендовано використання вільно розповсюджуваного програмного продукту, наприклад, відкритих пакетів прикладних програм OpenFOAM [1], Code\_Aster [2], Code\_Saturne [3], FreeFEM [4].

Одним з найбільш перспективних відкритих пакетів, що швидко розвиваються, є OpenFOAM. Він розробляється світовою OpenFOAM спільнотою під загальною координацією OpenCFD Ltd і знаходиться у відкритому легальному доступі, який не передбачає ліцензування [1].

Крім того, для виконання завдань курсової роботи пропонується користуватися одним з відомих комерційних пакетів прикладних програм аерогідродинамічного спрямування: PHOENICS, STAR-CD, ANSYS, FLUENT, CFX, FlowVision, COSMOS FloWorks та інші.

Ліцензована версія ANSYS доступна студентам кафедри Фізики енергетичних систем [5].

Демонстраційна версія Flowvision доступна у відкритому доступі для скачування з сайту компанії-розробника "Tecsc" і її функціональність достатня для виконання даної курсової роботи [6];

SimScale - потужний пакет з режимом повнофункціонального та безкоштовного для студентів й представників академічної науки "хмарного" доступу через web-інтерфейс та з можливістю виконання розрахунків на багатоядерних обчислювальних серверах німецької компанії-розробника "SimScale") [7]

Враховуючи розмаїття інтерфейсів та функціональності зазначених вище програмних засобів та особливості роботи з ними, у подальших рекомендаціях йтиметься не про безпосередній порядок дій в якомусь з цих пакетів, а про концептуальні складові етапів виконання роботи та очікувані результати, які супроводжуватимуться відповідними розрахунковими прикладами.

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ

Вимоги до оформлення курсової роботи з дисципліни «Моделювання фізичних процесів» відповідають вимогам до оформлення дипломних робіт бакалаврів для студентів спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» [8].

Курсову роботу подають у друкованому вигляді на аркушах формату А4 (210 x 297 мм) без переплетення з книжним розташуванням сторінок, шрифтом Times New Roman 14 пунктів, міжрядковий інтервал 1,5 обсягом від 10 до 25 сторінок. Відстань між абзацами 1,5 інтервали.

Структурні елементи «ЗМІСТ», «ВСТУП», «ВИСНОВКИ», «ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ», і заголовки розділів слід розташовувати посередині рядка і друкувати великими літерами без крапки в кінці, напівжирним шрифтом. Заголовки підрозділів, пунктів і підпунктів слід починати з абзацного відступу і друкувати маленькими літерами, крім першої великої, не підкреслюючи, без крапки вкінці. Відстань між заголовком і подальшим та попереднім текстом – один рядок. Кожен розділ курсової роботи починається з нової сторінки. Підрозділи нумерують у межах кожного розділу. Номер підрозділу складається з номера розділу і порядкового номера підрозділу, між якими ставиться крапка (2.3). Пункти нумерують у межах кожного підрозділу, підпункти – у межах кожного пункту за такими ж правилами (1.3.2, 1.3.2.1).

Першою сторінкою курсової роботи є титульна (додаток А), другою сторінкою – зміст, третьою – постановка задачі. Всі сторінки включаються до загальної нумерації, але на титульному листі номер не проставляється. Сторінки нумеруються у правому верхньому куті без крапки в кінці.

Нумерацію сторінок, розділів, підрозділів, пунктів, підпунктів, рисунків, таблиць, формул подають арабськими цифрами. Ілюстрації, таблиці, формули слід нумерувати порядковою нумерацією в межах розділу, наприклад, рис. 3.2 , таблиця 1.1, формула (2.4).

Ілюстрації (фотографії, креслення, схеми, графіки, діаграми) і таблиці необхідно подавати у роботі безпосередньо після тексту, де вони згадані вперше, або на наступній сторінці. До ілюстрації і таблиці в тексті роботи, також, як і після неї, повинен бути пропущений один рядок. На всі ілюстрації і таблиці мають бути посилання у тексті роботи. Кожна ілюстрація повинна мати пояснювальний (підрисунковий) текст, який розміщують після тіла ілюстрації по центру, наприклад: «Рис. 3.1 Схема дискретизації». Таблиці оформлюються



наступним чином. На першому рядку справа вказується номер (Таблиця 1.1), на другому по центру – назва (не обов'язково), нижче – тіло таблиці.

Формули і рівняння набираються в редакторі формул Equation або MathType. Пояснення значень символів і числових коефіцієнтів слід наводити безпосередньо під формулою у тій послідовності, в якій вони наведені у формулі чи рівнянні. Формули, що йдуть одна за одною й не розділені текстом, відокремлюють комою.

Приклади оформлення розділів, формул, а також ілюстративних матеріалів надано в наступному розділі.

Перелік літературних джерел оформлюється в порядку посилань у тексті. Кожне джерело, що включено до списку, має бути відбито у тексті роботи. Бібліографічний опис джерел складають відповідно до чинних стандартів. Приклади оформлення надано в розділі «Перелік використаних джерел».

## РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ РОЗДІЛІВ КУРСОВОЇ РОБОТИ

В цьому розділі представлено рекомендації до змісту курсової роботи з дисципліни «Моделювання фізичних процесів». Надано матеріал з прикладами, яким потрібно заповнювати структурні елементи роботи. Поділ на розділи, підрозділи, пункти, підпункти може відрізнятися від запропонованого в даних методичних рекомендаціях, а його деталізація залежить від наповненості.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Формулюється явище, що вивчається, об'єкт дослідження, властивості середовища, режим течії, тощо.

*Приклад:*

В даній курсовій роботі досліджуються нестационарні течії нестисливої рідини навколо циліндру в широкому діапазоні чисел Рейнольдса.

Слідом записується мета курсової роботи. Під метою дослідження прийнято розуміти можливий прогноз результату дослідження. Мета може бути тільки одна. Формулювання мети може починатися зі наступних вступних слів:

- виявити закономірності...
- розробити новий спосіб...
- проаналізувати залежність...
- знайти взаємозв'язок...
- з'ясувати...
- визначити...
- позначити...

*Приклад:*

Ціль даної роботи – розробити чисельну методику розрахунку ламінарної та турбулентної течії в'язкої нестисливої рідини в плоскому каналі.

## 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

### 2.1 Система визначальних рівнянь

В цьому підрозділі роботи наводяться рівняння математичної моделі.

*Приклад:*

В якості математичної моделі поставленої задачі вибрано рівняння Нав'є-Стокса для нестисливого середовища та рівняння нерозривності [9-11]:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

де  $\mathbf{v} = \{v_x, v_y, v_z\}$  – вектор швидкості,  $p$  – тиск,  $\rho$  – густина рідини.

Якщо використовується модель турбулентності, вказати тип (RAS або LES) та назву [12, 13]. Бажано навести рівняння моделі та відповідні константи.

### 2.2 Граничні умови

Наводяться початкові умови системи рівнянь (1, 2) та умови на всіх границях. Необхідно вказати, до яких фізичних величин буде застосовано пристінкові функції.

### 2.3 Масштабний аналіз

Вказуються характерні масштаби задачі та критерії подібності.

Моделювання різних фізичних процесів виходить з подібності явищ, що вивчаються. Два явища називаються подібними, якщо за характеристиками одного можна отримати характеристики іншого шляхом простого перерахунку, аналогічно переходу від однієї системи одиниць до іншої. Умовами подібності двох явищ є рівності безрозмірних параметрів, які називаються числами подібності.

Масштабний аналіз поставленої задачі обґрунтовує вибір тієї, чи іншої математичної моделі: стислива або нестислива, стаціонарна або нестаціонарна, ламінарна або турбулентна, тощо.

### 3. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

#### 3.1 Підготовка вихідних даних

Дискретне представлення обчислювальної області (сітка) є складовою частиною чисельного моделювання і значною мірою визначає успіх або невдачу чисельного розв'язку задачі.

Розрахункова (обчислювальна) сітка – це сукупність точок (сіткових вузлів), що задані в області визначення деякої функції. Процедура побудови розрахункової сітки можна розглядати як побудову взаємно-однозначного відображення області визначення функції (фізичної області) на деяку розрахункову область, що має більш просту форму.

В цьому підрозділі роботи необхідно вказати засоби, що було використано для побудови розрахункової сітки, та обґрунтувати свій вибір.

##### 3.1.1 Геометрія розрахункової області

Описуються:

- геометричні параметри об'єкта, що досліджується (рис. 3.1);
- метод побудови геометрії, на яку буде накладатися розрахункова сітка;
- схема поділу на блоки, якщо необхідно (рис. 3.2).

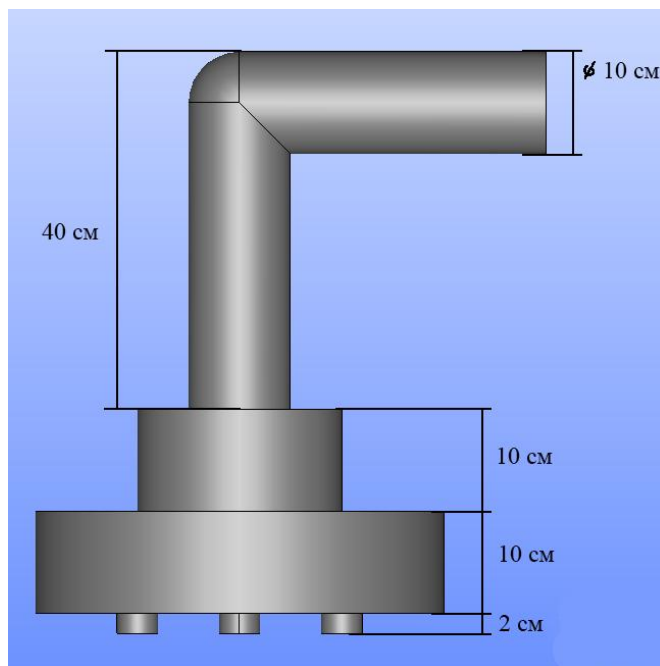


Рис. 3.1 Розміри душової лійки

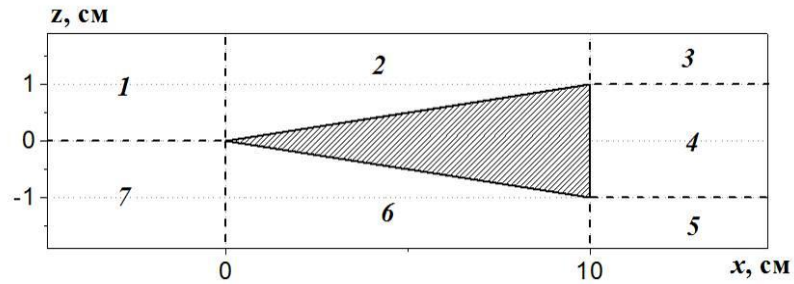


Рис. 3.2 Схема поділу розрахункової області на блоки

### 3.1.2 Розрахункова сітка

Описуються алгоритми та гіпотези дискретизації сітки та підсіток, метод згущення, тощо. Показати схему дискретизації подібно до рис. 3.3.

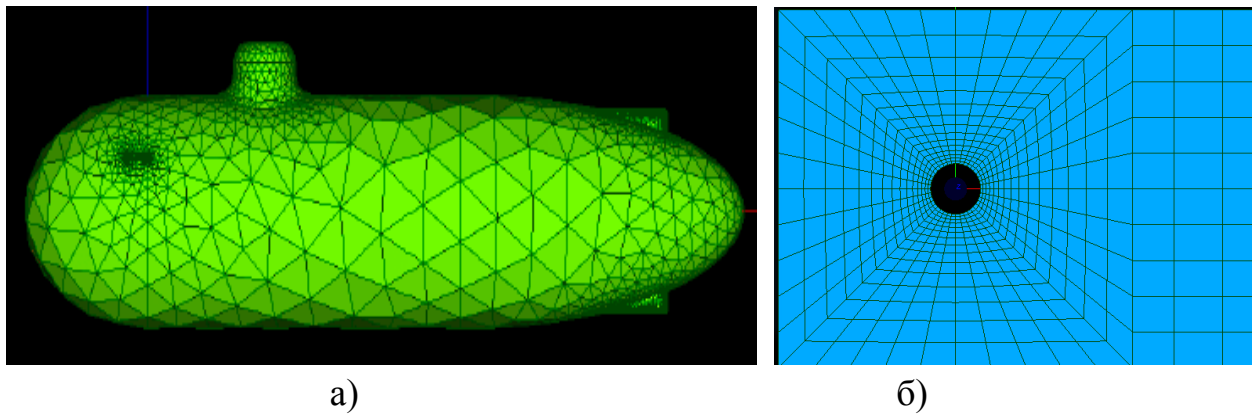


Рис. 3.3 Схема неструктурованої (а) та блочно-структурованої сітки (б)

## 3.2 Чисельна модель

В даному підрозділі необхідно:

- вказати пакет прикладних програм, в якому було розв’язано поставлену задачу;
- обґрунтувати вибір пакету із порівняльного аналізу сучасних обчислювальних технологій;
- описати метод чисельного моделювання [14-17]:
  - метод скінченних різниць – заміна похідних на їхні різницеві аналоги,
  - метод скінченних об’ємів, що використовує інтегральні співвідношення для примітивних об’ємів,

- метод скінченних елементів – представлення шуканого розв'язку в вигляді суперпозиції функцій форми,
  - інші методи: дискретний метод Гальоркіна або комбінації попередніх;
- вказати мову програмування;
- обрати чисельну модель (solver), що реалізує описану вище математичну модель.

### 3.2.1 Схеми дискретизації системи визначальних рівнянь

Необхідно навести використані схеми дискретизації похідних за часом та простором (дивергенція, градієнт, оператор Лапласа), порядок точності, схеми інтерполяції на грані та ін.

У відкритому пакеті прикладних програм OpenFOAM інформацію про дискретизацію кожної змінної фізичної величини можна знайти у файлі system/fvSchemes [18].

*Приклад:*

- За часом було вибрано стандартну явну схему дискретизації Ейлера першого порядку точності.
- Дискретизація градієнтів:  
 default Gauss linear – стандартна дискретизація скінченного об'єму гауссівського інтегрування, що вимагає інтерполяції значень від центрів комірок до центрів граней [15];  
 grad(U,k,epsilon) Gauss limitedLinearV 1 – схема мінімізації повної варіації (TVD – Total Variation Diminishing) підвищеного порядку точності [19].
- Схема дискретизації дивергенції:  
 div(phi,U) bounded Gauss linearUpwind grad(U);  
 div(phi,k) bounded Gauss upwind;  
 div(phi,epsilon) bounded Gauss upwind;
- Схеми для лапсасіана – Gauss linear corrected

### 3.2.2 Процедура сумісної корекції полів швидкості та тиску

Описуються процедура сумісної корекції полів швидкості та тиску, яку можна знайти у файлі system/fvSolutions, використовуючи для комп'ютерного моделювання відкритий пакет OpenFOAM [18].

Найбільш поширеними ітераційними процедурами для розв'язку рівнянь для швидкості і тиску є наступні [9]:

SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) – напівнеявний метод, який використовується для нестационарних задач, виконує тільки 1 корекцію.

PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) – неявний метод зв'язку полів тиску і швидкості, що призначений для розв'язку нестационарних задач, вимагає більше 1 коректора, але зазвичай не більше 4.

PIMPLE являє собою комбінацію PISO та SIMPLE, використовуються для нестационарних випадків. Але головна перевага цього методу – фіксоване число Куранта, що забезпечує кращу стійкість розв'язку, особливо при роботі з великими часовими кроками.

### 3.2.3 Методи розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь

Описуються методи розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь, які задаються у файлі розрахункової задачі system/fvSolutions пакету OpenFOAM [15, 18].

Для симетричних матриць:

- ICCG – метод сполучених градієнтів з передобумовником типу неповної факторизації Холецкого;
- DCG – метод сполучених градієнтів з діагональним передобумовником;
- AMG – алгебраїчний багатосітковий метод.

Для несиметричних матриць:

- ICCG – метод біо-сполучених градієнтів з передобумовником (метод неповної факторизації Холецкого);
- метод Гаусса-Зейделя.

*Приклад:*

Для розв'язку отриманої системи лінійних алгебраїчних рівнянь у відкритому пакеті OpenFOAM застосовувалися ітераційні методи спряжених градієнтів PCG для симетричних матриць, а для асиметричних матриць – метод бі-спряжених градієнтів PBiCG. В якості передобумовника для симетричних матриць була обрана процедура DIC, що заснована на спрощеній схемі неповної факторизації Холецкого. Предобумовник DILU, в основі якого спрощена неповна LU факторизація, використовувався для асиметричних матриць.

### 3.3 Розрахунковий експеримент

В даному підрозділі курсової роботи вказуються:

- часові умови розрахунку: крок за часом, кінцевий час розрахунку, з яким кроком виводилася інформація;
- режим запуску задачі: інтерактивний або пакетний,
- параметри декомпозиції розрахункової області, якщо обчислення проводилися в паралельному режимі, а також ефективність розпаралелювання;
- чи проводився контроль збіжності розв'язку (рис. 3.4);
- значення похибки чисельного експерименту;
- яким чином здійснювалася умова збіжності Куранта:

$$Co = \frac{\delta t |v|}{\delta x} < 1$$

де  $\Delta x$  – розмір комірки,  $\Delta t$  – крок за часом,  $v$  – швидкість.

Також необхідно навести методи обробки та візуалізації результатів розрахунків.

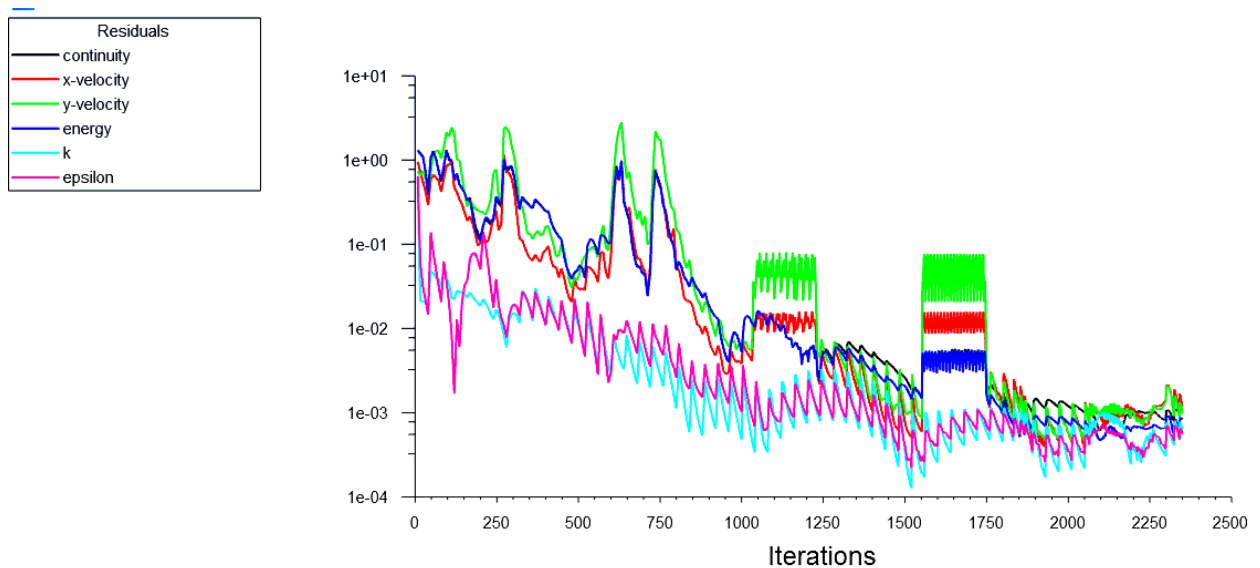


Рис. 3.4 Контроль збіжності обчислень



#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ

В даному розділі курсової роботи наводяться результати розрахунку: поля (рис. 4.1-4.6), лінії течії (рис. 4.7), ізоповерхні (рис. 4.8), графіки залежності (рис. 4.9-4.11), тощо. Рисунки повинні мати посилання в тексті і супроводжуватися якісним та кількісним аналізом отриманих результатів, наприклад, як змінюється поле тиску з часом, або як структура течії залежить від числа Рейнольдса.

Рекомендується приділити увагу обробці та візуалізації результатів розрахунку (postprocessing) [1, 18, 20-22], що включає:

- розрахунки полів додаткових фізичних величин, що не входять в систему рівнянь: завихореність, градієнти фізичних величин, компоненти тензора напружень Рейнольдса та ін. (рис. 4.4; 4.6; 4.9, б);
- аналіз процесу еволюції фізичних величин в контрольних точках з метою визначення стаціонарності процесу (рис. 4.9);
- розрахунки інтегральних фізичних величин: коефіцієнтів опору тертя, підйомної сили, тепловіддачі, тощо (таблиця 4.1; 4.2);
- порівняння результатів розрахунків з відомими в літературі теоретичними та експериментальними даними (рис. 4.12).

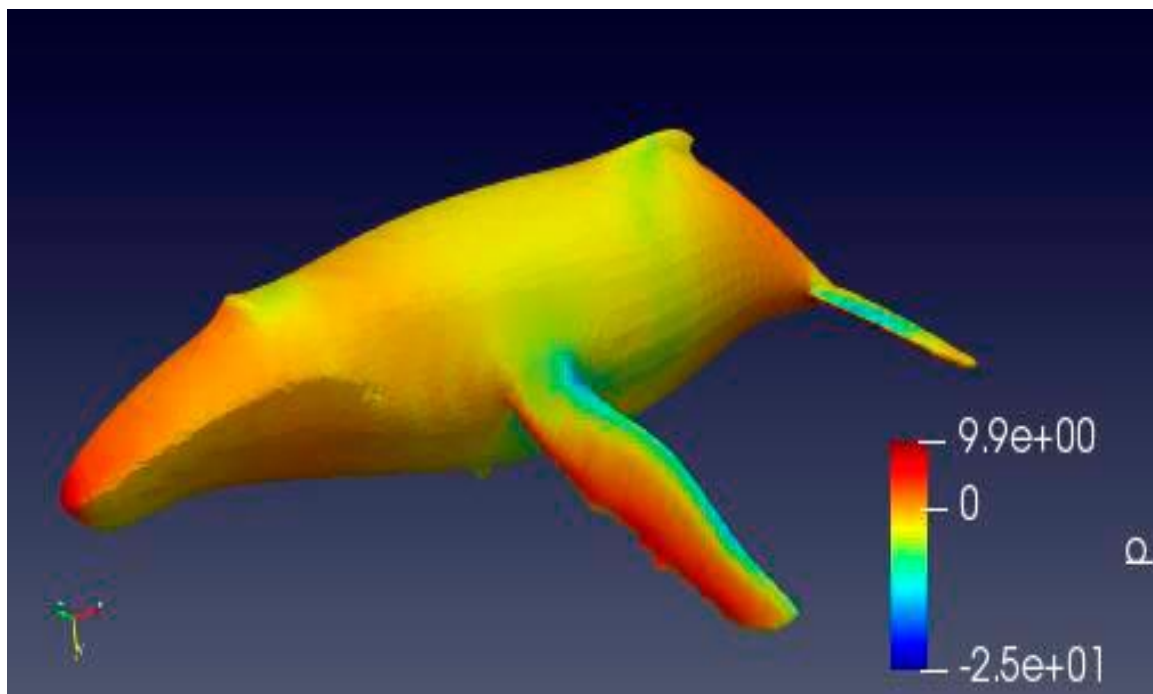


Рис 4.1 Розподіл тиску на поверхні кита в момент часу  $t = 16$  с

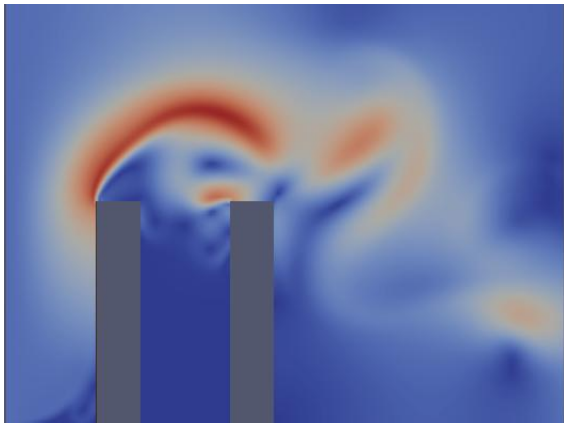
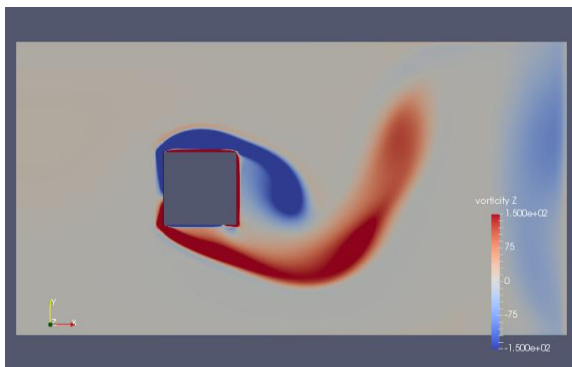


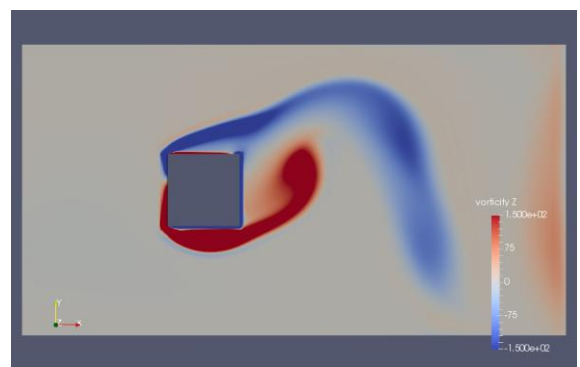
Рис. 4.2 Поле модуля швидкості



Рис. 4.3 Поле температури при  $Re = 8 \cdot 10^3$



а)



б)

Рис 4.4 Миттєві поля поперечної компоненти завихреності  $\omega_z$

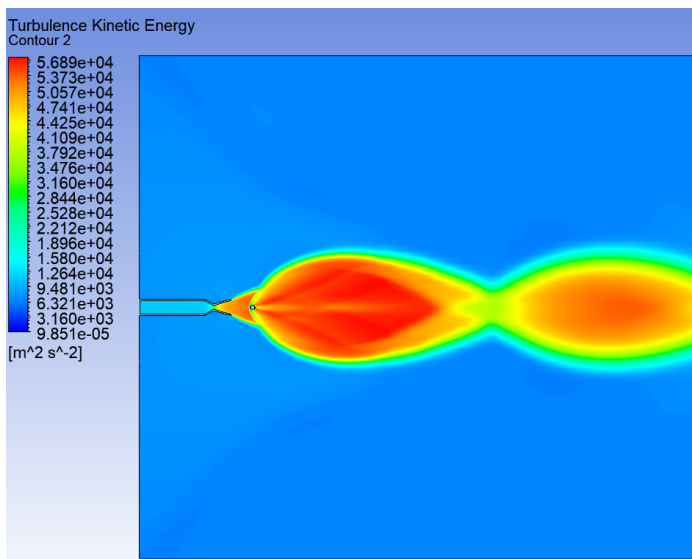


Рис. 4.5 Розподіл поля кінетичної енергії турбулентності  $k$

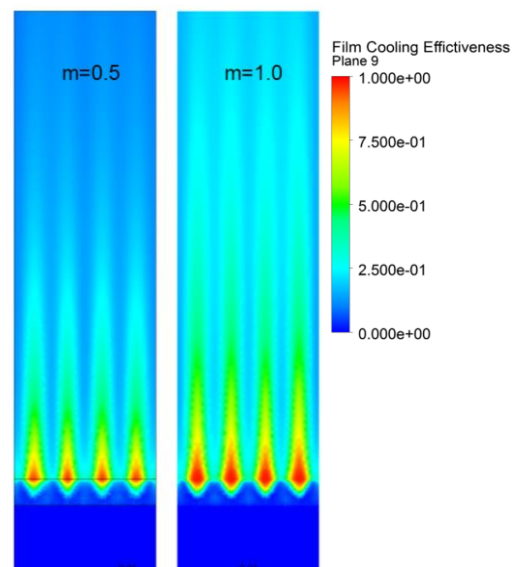
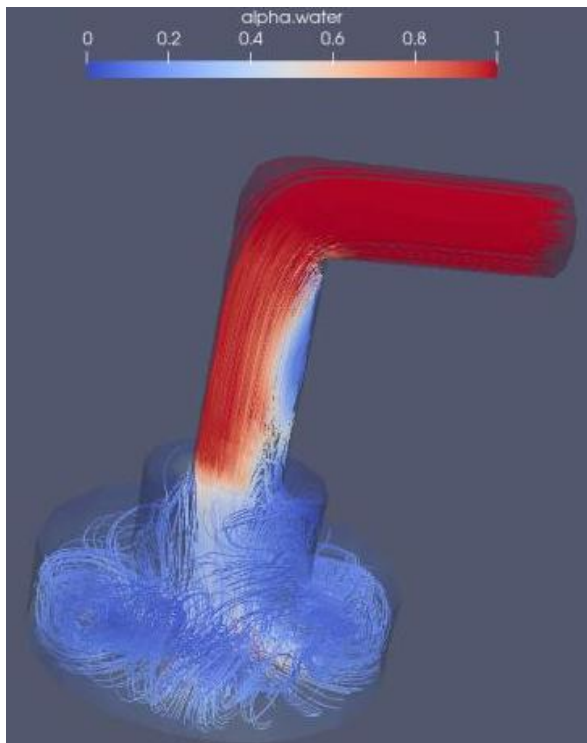
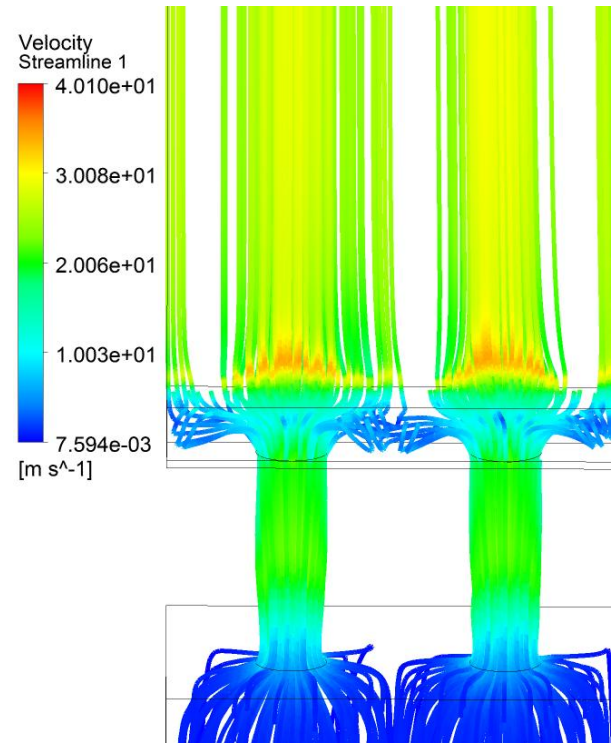


Рис. 4.6 Локальна ефективність плівкового охолодження

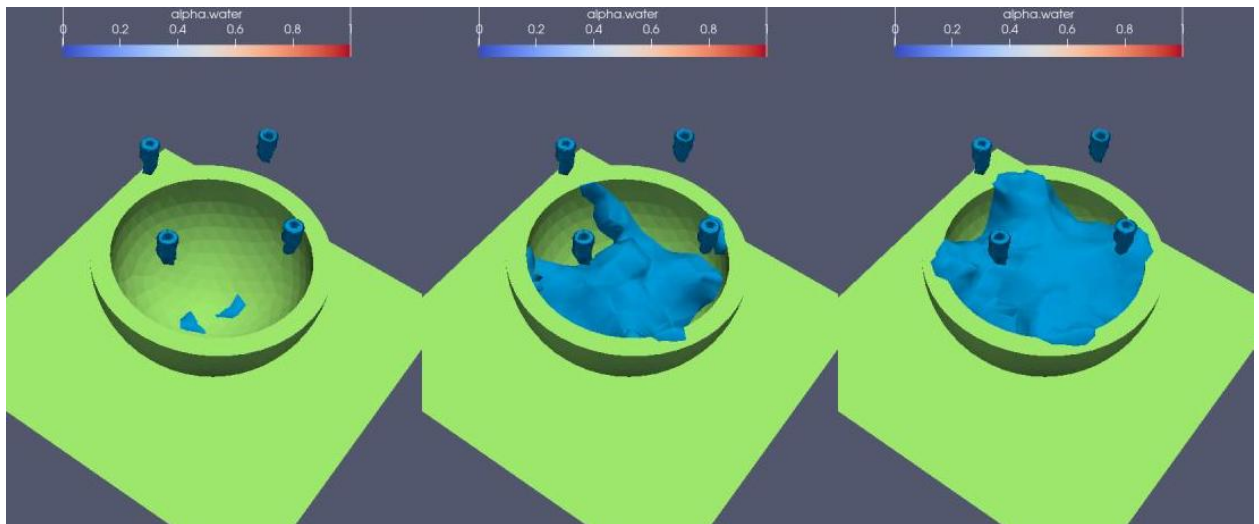


а)



б)

Рис. 4.7 Лінії течії



а)

б)

в)

Рис. 4.8 Ізоповерхні  $\alpha = 0.3$ , що розділяють фази води та повітря в момент часу  $t = 2.6$  с (а); 5 с (б); 10 с (в)

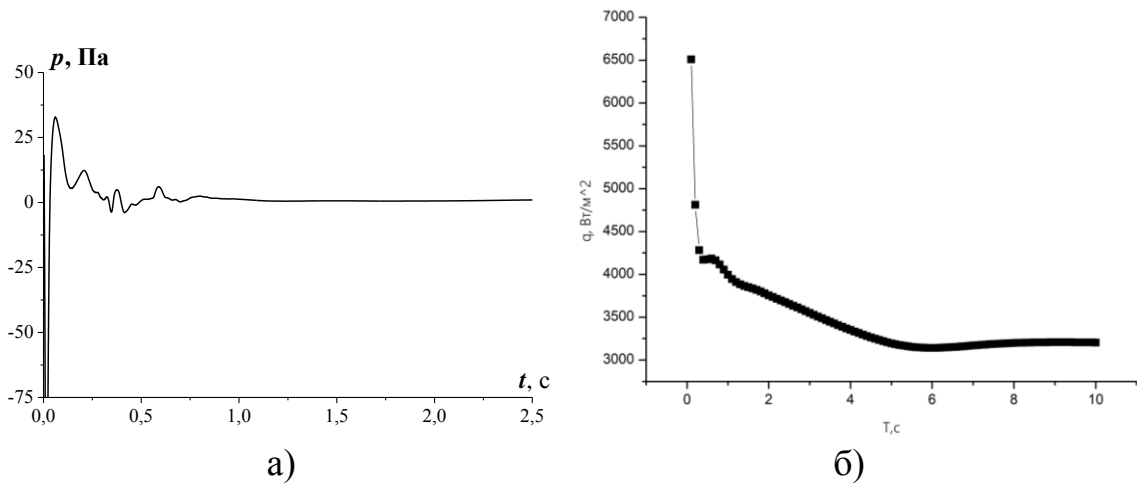


Рис. 4.9 Залежність тиску (а) і щільності теплового потоку (б) від часу в контрольній точці з координатами (8;0;0) мм

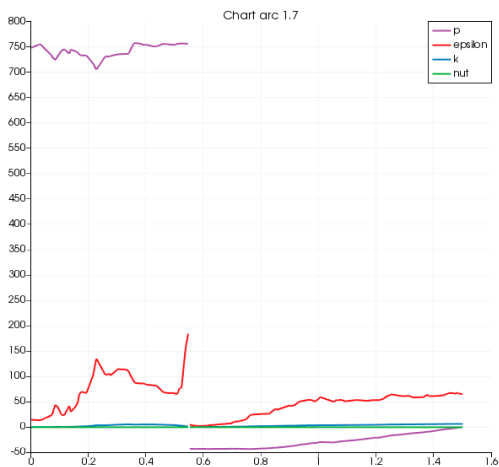


Рис. 4.10 Графік зміни фізичних величин вздовж відрізка (-0.5;0.0;0.3)-(1.0;0.0;0.3)

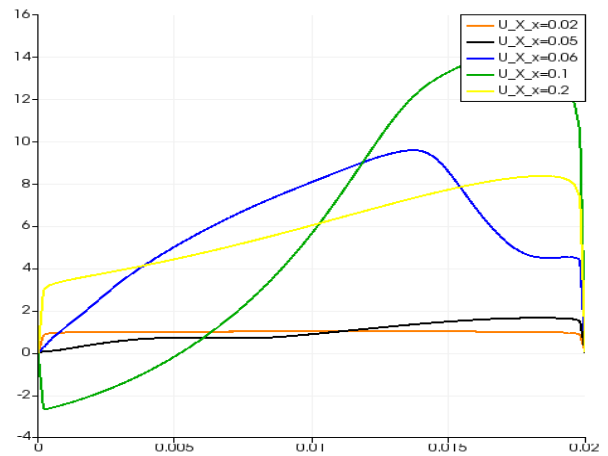


Рис. 4.11 Розподіл поздовжньої компоненти швидкості  $U_x$  в центральному перерізі

Таблиця 4.1

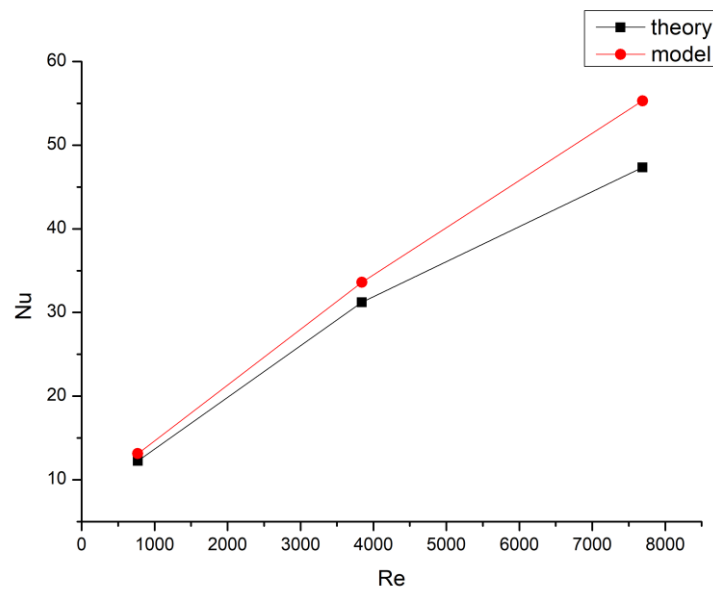
Коефіцієнти інтегральних сил по поверхні лопастей

# Time	Cm	Cd	Cl	Cl(f)	Cl(r)
Зігнута лопасть					
1.7	5.73E+04	2.05E+02	-1.91E+01	5.73E+04	-5.73E+04
Пряма лопасть					
1.7	9.67E+03	3.46E+01	-1.36E-02	9.67E+03	-9.67E+03

Таблиця 4.2

## Конвективний теплообмін при різних режимах течії

Re	$Nu_{\text{model}}$	$Nu_{\text{theory}}$	$q, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$
$7,69 \cdot 10^2$	13,12	12,24	3200
$3,84 \cdot 10^3$	33,6	31,21	8200
$7,69 \cdot 10^3$	55,3	47,34	13500

Рис 4.12 Порівняння теоретичної залежності числа  $Nu$  від числа  $Re$  та результатів комп'ютерного моделювання

## **ВИСНОВКИ**

Загальні висновки є завершальною та важливою частиною курсової роботи. На підставі отриманих результатів необхідно зробити остаточні висновки щодо оптимального вибору таких структурних елементів побудованої комп'ютерної моделі дослідженого фізичного явища як: структура та розмір сітки, модель турбулентності, апроксимаційна схема та задіяний числовий метод розв'язку за критеріями точності розрахунку з точки зору його спроможності відтворювати визначальні відомі фізичні особливості течії та його тривалості, а також ступінь реалізації поставленої мети. У висновках необхідно наголосити на якісних та кількісних показниках здобутих результатів, обґрунтувати достовірність результатів.

Висновки краще представляти у вигляді послідовно пронумерованих абзаців. При цьому кожен абзац має містити окремий логічно завершений висновок чи рекомендацію.

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Електронний ресурс – <https://www.openfoam.com/>
2. Електронний ресурс – <https://www.code-aster.org>
3. Електронний ресурс – <https://www.code-saturne.org/>
4. Електронний ресурс – <https://freefem.org/>
5. Електронний ресурс – <https://www.ansys.com/>
6. Електронний ресурс – <https://flowvision.ru/>
7. Електронний ресурс – <https://www.simscale.com/>
8. Методичні вказівки до виконання дипломної роботи бакалаврів для студентів спеціальності 6.040204 «Прикладна фізика» [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Т. В. Доник, А. В. Гільчук, В. С. Ткач – Електронні текстові дані (105,86 Кбайт). – Київ, 2019. – 40 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30047>
9. Mathematical Methods in Engineering and Applied Sciences. – Ed. by H. Dutta. – CRC Press, 2020. – 308 p. – ISBN-10: 0367359774, ISBN-13: 978-0367359775
10. Механіка суцільних середовищ [Текст] : підручник / П. Трохимчук ; Східноєвроп. нац. ун-т ім. Лесі Українки. – Луцьк : Вежа-Друк, 2018. – 166 с. – ISBN 978-966-940-114-4
11. Механіка суцільних середовищ – 1. Механіка суцільних середовищ в інженерних розрахунках [Електронний ресурс] : текст лекцій для студентів спеціальності «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології виробництв полімерних та будівельних матеріалів і виробів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. С. Сахаров, А. Я. Карвацький ; ред. І. О. Мікульонок. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,38 МБ). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 233 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19011>
12. Карвацький, А. Я. Механіка суцільних середовищ – 2. Нелінійні задачі механіки суцільних середовищ. Конспект лекцій з навчальної дисципліни [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів і виробів» / А. Я. Карвацький ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,42 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 94 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23918>

13. Халатов, А. А. Основи теорії примежового шару [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / А. А. Халатов, Є. В. Мочалін, Н. Ф. Димитрієва ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,86 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 191 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/26035>
14. Задачин В. М. Чисельні методи : навчальний посібник / В. М. Задачин, І. Г. Конюшенко. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 180 с.
15. Методи обчислень: Частина 1. Чисельні методи алгебри [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 113 «Прикладна математика», спеціалізації «Наука про дані (Data Science) та математичне моделювання» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. В. Третиник, Н. Д. Любашенко. – Електронні текстові дані (1 файл: 21,3 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 138 с. – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/28225>
16. Tu J. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach, 3<sup>d</sup> Edition / J.Tu, G.H.Yeoh, C.Liu. – Butterworth-Heinemann, 2018. – 498 p. – Paperback ISBN: 9780081011270, eBook ISBN: 9780081012444
17. Dimitrieva N. F. Calculation of nonuniform fluid flows in a gravity field / N. F. Dimitrieva // In Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics, ed. D. Šimurda and T. Bodnár, Prague, 2020, pp. 48-55. <https://doi.org/10.14311/TPFM.2020.007>
18. Електронний ресурс – <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/>
19. Denner F. TVD differencing on three-dimensional unstructured meshes with monotonicity-preserving correction of mesh skewness / F. Denner, B. G. M. Van Wachem // Journal of Computational Physics. – 2015. – V. 298. – P. 466–479. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2015.06.008>
20. Електронний ресурс – <https://github.com/OpenFOAM/OpenFOAM-5.x/tree/master/etc/caseDicts/postProcessing>
21. Електронний ресурс – <https://www.kitware.com/>
22. Електронний ресурс – <http://paraview.org/Wiki/ParaView>





Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Фізико-технічний інститут

Курсова робота  
з дисципліни «Моделювання фізичних процесів»  
на тему **«Моделювання нестационарної течії навколо циліндру»**

Виконав:

Студент ІV курсу ФТІ

групи \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

(Прізвище І.Б.)

Прийняв:

ас. каф. ФЕС Димитрієва Н.Ф.

Київ 202\_ р