

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Кульчевич Артур Валерійович
Керівник: Гуржій Олександр Андрійович

УДК 532.5

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ АЕРАЦІЇ ЗАБРУДНЕННЯ ВСЕРЕДИНИ
ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ**

Спеціальність 8.05010102
«Інформаційні технології проектування»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття освітньо-кваліфікаційного
рівня магістр

Київ – 2016

Робота виконана на кафедрі автоматизації проектування енергетичних процесів та систем НТУУ «КПІ» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Гуржій Олександр Андрійович
професор кафедри автоматизації проектування
енергетичних процесів і систем НТУУ «КПІ» (м. Київ)

Рецензенти: провідний науковий співробітник,
Інститут гідромеханіки НАН України,
доктор технічних наук Воскобійник В.А.

Захист відбудеться __ червня 2016 р., на засіданні ДЕК кафедри АПЕПС НТУУ
„КПІ” аудиторія _____

З дисертацією можна ознайомитись у методичному кабінеті кафедри АПЕПС
НТУУ „КПІ”, аудиторія _____ .

Реферат підготовлено та представлено до розгляду „__” _____ 2016 р.
Робота рекомендована до захисту „__” _____ 2016 р.

Завідуючий кафедрою АПЕПС НТУУ „КПІ”,
доктор технічних наук, професор

Лук’яненко С. О.

Відповідальний за випуск магістрів
кафедри АПЕПС НТУУ «КПІ»,
кандидат технічних наук, доцент

Гагарін О. О.

РЕФЕРАТ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сьогодні проблема формування стійкого і контрольованого розподілу повітряних потоків, а також отримання оцінок розподілу забруднень у повітряних потоках при можливих аваріях, несанкціонованих технологічних викидах і інших випадках, непередбачених штатними технологічними процесами на виробничих і промислових підприємствах різного призначення, являє собою складну архітектурну, конструкторську і наукову проблеми. Тому досить актуальним в даному випадку є створення пакету прикладних програм, які після отримання необхідних даних про промислове приміщення дозволяють досить точно спрогнозувати динаміку руху повітря та, у випадку потрапляння шкідливих речовин, їх подальше розповсюдження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота магістра виконувалась у НТУУ "КПІ" у відповідності з планом наукових досліджень кафедри АПЕПС.

Метою дослідження є виявлення еволюції руху пасивного забруднення під дією організованої природної вентиляції залежно від місця виявлення цього забруднення та геометричної форми приміщення, а також створення пакету прикладних програм для розв'язку задачі процесу розповсюдження шкідливих речовин в середині промислового приміщення шляхом аерації.

Для реалізації поставленої мети були сформульовані наступні **завдання дослідження**, що визначили логіку дослідження та його структуру:

- проаналізувати існуючі методи моделювання процесів адвекції скалярних полів у суцільному середовищі;
- проаналізувати основні чисельні методи моделювання динаміки переносу виділеного об'єму суцільного середовища;
- здійснити програмну реалізацію розроблених методів.

Об'єктом дослідження є комп'ютерні технології моделювання процесів переносу скалярних полів у внутрішніх течіях.

Предмет дослідження: комп'ютерні технології моделювання процесу забруднення в промислових приміщеннях під дією процесів аерації.

Методи дослідження: розв'язання поставлених задач виконувалось на базі положень математичних методів, зокрема:

- методу Гауса для розв'язання СЛАР;
- методу Рунге-Кутта-Фельберга 4-го порядку для розв'язання системи однорідних диференціальних рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів. Найбільш суттєвими науковими результатами магістерської дисертації є:

- удосконалено метод дискретних особливостей для моделювання двовимірного процесу переносу скалярних полів у внутрішніх течіях за рахунок зміщення системи точкових вихорів від границі, що призвело до більш точного задоволення граничних умов непротікання на границях течії;
- набуло подальшого розвитку застосування комп'ютерної візуалізації в моделюванні процесу аерації забруднення в середині промислових приміщень.

Практичне значення одержаних результатів визначається тим, що запропоновані підходи дозволять полегшити розробку комп'ютерної моделі процесів аерації забруднення повітря всередині замкнутого приміщення. Такі моделі значно спрощують процес прийняття рішень, що пов'язані з ліквідацією наслідків екологічних аварій в безпосередній близькості до промислових приміщень.

Апробація результатів дисертації

Основні положення роботи доповідались і обговорювались на XIII, XIV Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (м. Київ, 21-24 квітня 2015 р., м. Київ, 18-21 квітня 2016 р.).

Публікації : немає.

Ключові слова. АЕРАЦІЯ, МЕТОД ДИСКРЕТНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ, ЕВОЛЮЦІЯ ПАСИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і завдання дослідження, представлені основні положення, що виносяться на захист.

В **першому розділі** проводиться дослідження процесу вентилявання промислових приміщень. Описується основна ціль вентиляції, вимоги які висуваються при її конструювання, типи вентиляції. Проводиться опис аеративного способу вентилявання приміщення, розглядаються схеми організації повітрообміну виробничого приміщення.

Виконується аналіз методів моделювання руху суцільного середовища.

На сьогоднішній день не існує єдиного чисельного методу, який дозволяв би вирішити таку початково-крайову задачу для довільного набору параметрів течій і геометрії обмежуючих поверхонь. До числа найбільш поширених чисельних методів рішення в механіці суцільних середовищ можна виділити декілька, найбільш розповсюджених, чисельних методів.

Метод кінцевих різниць. Цей чисельний метод застосовується для розв'язання як лінійних так і нелінійних рівнянь другого порядку гіперболічного, еліптичного, параболічного типів. Похідні функцій по всім напрямкам замінюються кінцевими різницями за допомоги тих чи інших співвідношень, найчастіше використовуються неявно різницеві схеми. Тоді доводиться розв'язувати на кожній ітерації систему лінійних алгебраїчних рівнянь, яка може містити до ста невідомих [], проводити аналіз стійкості схеми на внесення невеликих змін різної природи (округлення, кінцівку розрядної сітки обчислювальної техніки і інше)..

Методом кінцевих об'ємів або методом контрольного об'єму. Основа суть методу полягає в тому, що розрахункова область за допомогою сітки розбивається на сукупність кінцевих об'ємів. Вузли, в яких шукається рішення, знаходяться в центрах цих об'ємів. Для кожного об'єму повинні виконуватися закони збереження маси, кількості руху і енергії. Тобто, наприклад, зміна в часі маси середовища в контрольному об'ємі може відбуватися тільки за рахунок зовнішнього потоку маси, що входить в об'єм, або за рахунок потоку маси з даного обсягу що виходить.

Метод кінцевих елементів. Метод кінцевих елементів базується на ідеї апроксимації безперервної функції (у фізичній інтерпретації - температури, тиску, переміщення і т.д.) дискретної моделі, яка будується на безлічі кусково-неперервних функцій, визначених на кінцевому числі підобластей, званих кінцевими елементами. Досліджувана геометрична область розбивається на елементи таким чином, щоб на кожному з них невідома функція апроксимувалася пробною функцією (як правило, поліномом). Причому ці пробні функції повинні задовольняти граничним умовам безперервності, що збігається з граничними умовами, що накладаються самим завданням. Вибір для кожного елемента апроксимуючої функції визначатиме відповідний тип елемента. В кінцевому підсумку доводиться розв'язувати варіаційну задачу щодо функціоналу (повна енергія системи, теплоємність, маса і інше), що визначає перебіг фізичного процесу в розглянутій динамічній системі. У методі кінцевих елементів, за аналогією з методом кінцевих об'ємів, доводиться також розв'язувати варіаційну задачу щодо функціоналу, побудованого для даного завдання.

Метод частинок. Цей метод використовує Лагранжів підхід до розгляду руху середовища. Суть даного методу полягає у визначенні руху окремих частинок середовища і подальшої інтерполяції значень досліджуваних величин між ними. Використовувана при цьому процедура апроксимації (або інтерполяції) складається з декількох етапів, основними серед яких є інтегральна апроксимація функцій розподілу у вигляді згортки з так званим ядром згладжування і подальша дискретизація обчислення даної згортки по окремих часток. Застосування подібної апроксимації дозволяє не тільки задати наближення для поля деякої величини, а й ефективно знаходити його градієнт, а також інші розповсюджені диференціальні оператори, в тому числі вищих порядків. Точність апроксимації по часткам, використовуваної в методі гідродинаміки згладжених частинок, залежить від наявності в носії ядра достатньої кількості (обмеженого знизу і зверху) сусідніх частинок. Часова ефективність вироблених розрахунків також залежить від цього числа частинок, так як воно визначає обсяг обчислень, що припадають на окрему частинку. Також до недоліків можна віднести високі вимоги до обчислювальної техніки, складність задачі граничних умов.

Метод інтегральних співвідношень. В цьому методі область інтегрування розбивається на полоси за допомоги кривих ліній, форма котрих визначається видом границь цієї області. Система рівнянь в часткових похідних, яка записана у дивергентній формі, інтегрується поперек цих полос, а потім підінтегральні функції представляються у вигляді визначених інтерполяційних виразів. Отримана у результаті апроксимуюча система звичайних диференціальних рівнянь інтегрується чисельно. Основний недолік цього метода полягає у важкості вирішенні крайової задачі для систем високого порядку. Метод інтегральних співвідношень, як і метод кінцевих різниць, може бути застосований до рівнянь різноманітних типів.

Метод дискретних вихорів. Суть методу полягає у тому, що неперервні вихрові шари, які моделюють основні поверхні і сліди, замінюють системою дискретних вихорів – прямолінійною або кільцевою. Часовий процес представляється у вигляді послідовних розрахункових шарів, при цьому граничні умови виконуються у кінцевому числі контрольних точок на несучій поверхні.

Другий розділ присвячено опису чисельних методів які використовуються для розв'язку поставленої задачі, а саме метод дискретних особливостей для визначення розподілу поля швидкості, метод розв'язку задачі Коші, за допомогою котрого відбувається моделювання процесу еволюції забруднення у суцільному середовищі, а також розглядається постановка та особливості задачі Коші.

Задачу розрахунку адвекції можна поділити на дві задачі. Перша задача пов'язана з визначенням поля швидкості, яке формується і змінюється при заданих граничних та початкових умовах. Друга задача залежить від отриманих результатів першої і стосується вона розрахунку еволюції забруднення у полі швидкості, котре було отримано в наслідок розв'язання першої задачі.

Для того щоб визначити розподіл поля швидкості $U(x, y, t)$ течії, що розглядається на довільній площині всередині приміщення, необхідно розглянути течію ідеального нестислого суцільного середовища на вході якої визначено розподіл швидкості течії U_0, V_0 .

Відомо, що вихор який має інтенсивність Γ і розміщений у точці з координатами (x_v, y_v) наводить течію, функція току $\Psi(x, y)$ яка записується в

прямокутній системі координат у вигляді.

$$\Psi(x, y) = -\frac{\Gamma}{4\pi} \ln[(x_v - x)^2 + (y_v - y)^2]. \quad (1)$$

Якщо течія наводиться системою точкових вихорів кількістю N з інтенсивністю $\Gamma_i, (i=1, \dots, N)$, тоді функція току визначається як суперпозиція впливу кожного з вихорів записується у вигляді

$$\Psi(x, y) = -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \Gamma_i \ln[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]. \quad (2)$$

Диференціювання функції 2 по просторовим координатам дозволяє визначити розподіл поля швидкості $U(x, y, t) = \{U(x, y, t), V(x, y, t)\}$ течії, котру наводить система N точкових вихорів.

$$U(x, y) = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \quad V(x, y) = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}. \quad (3)$$

Для задоволення граничної умови непротікання рідини в термінах функції току

$$\Psi(x, y)|_S = \text{const} \quad (4)$$

уздовж стінки приміщення, введемо систему N точок колокацій розташованих на відстані δ_i одна до одної. Кожній точці колокації ставиться у відповідність фіксований в просторі точковий вихор з невідомої інтенсивністю. У методі дискретних особливостей кількість вихорів і повинна співпадати з кількістю точок колокацій. На рисунку 1 зображено приклад розташування точок колокації та точкових вихорів. Система фіксованих точкових вихорів на малюнку показана кружечками, а відповідна їм система точок колокацій, розташований на границі течії, позначений на малюнку кружечком. Дослідження показали, що для забезпечення гладкості розподілу поля швидкості на границі у внутрішній течії кожен вихор зсуємо на Δ_i ($i=1, \dots, N$) щодо границі. В цьому випадку інтегральна помилка розходження лінії струму з границею

течії на площині буде мінімальною і розподіл поля швидкості в даному перебігу матиме максимальну точність.

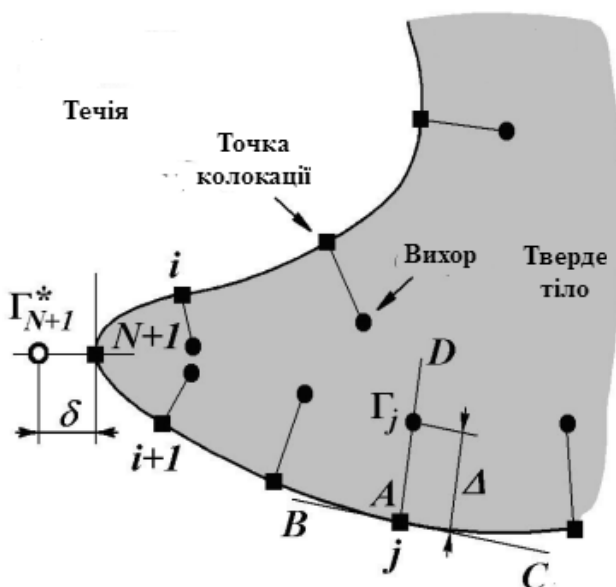


Рисунок 1 Приклад розташування точок колокації та точкових вихорів

В методі дискретних особливостей інтенсивність Γ фіксованих точкових вихорів розраховуються за умови рівності значення функції току (2) наведеної всіма вихорами в точках колокації. У цьому випадку значення функції току на границі приймає однакове значення i , як результат, гранична умова (4) виконується. В підсумку отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відносно невідомих інтенсивностей точкових вихорів в наступному виді

$$\Gamma_i \ln[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2] = -4\pi\Psi_j, \quad (5)$$

де Ψ_j – значення функції току в j -й точці колокації.

Після розв'язку цієї системи отримуємо значення інтенсивностей точкових вихорів що дає можливість визначити розподіл полів функції току (2) і для довільної точки течії компоненти поля швидкості (3).

Наведено огляд задачі Коші в загальному вигляді, описано особливості її постановки та вирішення. Проведено класифікацію та аналіз методів чисельного розв'язку задачі Коші.

Обґрунтовано зведення задачі до задачі Коші з початковими умовами. Описано математичний апарат вирішення задачі, виведено рівняння, що описують досліджуваний процес в конкретних умовах.

Обґрунтовано вибір методу Рунге-Кутта-Фельберга четвертого порядку для розв'язку задачі Коші. Наведено загальний опис методів Рунге-Кутта, розглянуто більш детально метод четвертого порядку точності, що застосований для вирішення досліджуваної задачі. Розглянутий метод Рунге-Кутта-Фельберга дає набір формул для обчислення координат контрольних маркерів. Розрахункові формули для задачі Коші методом Рунге-Кутти-Фельберга 4-го порядку має наступний вид:

$$k_1 = f(x_k, y_k), \quad k_2 = f\left(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}k_1\right), \quad k_3 = f\left(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}k_2\right), \quad k_4 = f(x_k + h, y_k + hk_3)$$

Обґрунтовано вибір методу Гауса для знаходження розв'язку СЛАР. Наведено загальний опис методу. Кількість арифметичних дій становить $O(n^3)$ на відміну від методу Крамера у якого $O(n!)$. Також можна виділити наступні переваги методу:

- не громіздкий, необхідно менше обчислень;
- можна вирішувати невизначені системи лінійних рівнянь;
- можна вирішувати системи лінійних рівнянь, в яких число невідомих не дорівнює числу рівнянь;
- метод легко програмується.

В **третьому розділі** проводиться опис програмної реалізації комп'ютерно-інформаційної системи. З кожним роком системи автоматизованого проектування набувають все нові функціональні можливості, що дозволяють користувачам вирішувати різні виробничі задачі. Серед існуючих на сьогоднішній день систем автоматизованого проектування можна виділити наступні, такі як SolidWorks, AutoCAD, Ansys, Mathematica. Ці системи несуть в собі дуже потужний математичний обчислювальний апарат, та засоби візуалізації та симуляції фізичних та інших процесів. Так, наприклад, широкі можливості базового модуля укупі з великою кількістю спеціалізованих додатків роблять SolidWorks потужним програмним комплексом, здатним гнучко налаштуватися для вирішення практично

будь-яких проектних і виробничих завдань. Завдяки цьому різні конфігурації SolidWorks знаходять широке застосування в багатьох задачах конструювання та моделювання.

Стосовно системи Ansys, то цей програмний комплекс складається з систем які надають можливість проводити розрахункові дослідження не тільки в таких окремих областях знання, як міцність, поширення тепла, механіки рідин і газів або електромагнетизм, але і вирішувати пов'язані задачі. Ця програма забезпечує оптимізацію проектних розробок на рівні, що дозволяє моделювати інженерні проблеми в найбільш повній постановці. Основний метод який використовується це метод кінцевих елементів.

Вище згадані пакети прикладних програм мають високу вартість і відносяться до класу пропріетарного програмного забезпечення. Це означає, що після придбання для користувача програмний код цієї програми закритий, також заборонено розповсюдження та інші дії над нею.

Розроблено програмний продукт моделювання процесів аерації забруднення виробничих приміщень. Він містить в собі простий і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Панелі керування даними та відображення результатів позбавлені від надлишкової інформації. Для виконання моделювання користувачеві необхідно знати лише фізику процесу, що позбавляє користувача від попередніх математичних обчислень. Програмний код відкритий, що дає змогу подальшого вдосконалення програмного комплексу.

В **четвертому розділі** описується методика та сценарії роботи користувача з програмною системою. Розглянуто порядок інсталяції програмного забезпечення, детальний опис роботи з програмним додатком включаючи опис всіх можливостей і сценаріїв використання створеного додатку.

В заключенні приводяться висновки по роботі.