

КОМПЛЕКСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВІЗУАЛЬНИХ ДАНИХ В САПР ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ТРАНСПОРТУВАННЯ

О.О. Арсірій, С.Г. Антощук, О.П. Василевська

Одеський національний політехнічний університет
arsiriy@te.net.ua

Анотація

При проектуванні складних елементів систем транспортування рідин або газів зі зниженими гідравлічними опорами пропонується застосування комплексного моделювання, що використовує інструментальні засоби фізичного і чисельного моделювання в поєднанні з можливостями інтелектуального аналізу візуальних даних.

1. Вступ

Одним з пріоритетних напрямків у розвитку сучасних енергозберігаючих технологій є проектування гідро-аеродинамічних систем з метою інтенсифікації енергетичних процесів. Досягнення цієї мети можливе за рахунок збільшення обсягу перемішуваного робочого тіла в системі транспортування без підвищення енергетичних витрат в нагнітачах. Досвід проектування гідро-аеродинамічних систем показує, можливість забезпечення інтенсифікації енергетичних процесів за рахунок зниження гідравлічних опорів в елементах систем транспортування (ЕСТ) рідин або газів, таких як колектори, повороти, трійники, раптові розширення або звуження і т. п. [1]. При цьому роботи дослідників в областях механіки рідини і газів, гідравлічних і аеродинамічних машин, САПР та інтелектуальних інформаційних технологій показують, що зниження гідравлічних опорів можливе при врахуванні реальної структури гідро-аеродинамічних потоків. Тому важливою теоретичною і практичною проблемою є виявлення і урахування структури гідро-аеродинамічних потоків при проектуванні ЕСТ складної форми [2-4]. У теперішній час для виявлення структури гідро-аеродинамічних потоків удосконалюються існуючі методи фізичного і чисельного моделювання у відповідних САПР в двох напрямках:

- автоматизуються методи фізичного моделювання засновані на теорії подібності моделі і реальних ЕСТ за рахунок створення ефективних візуальних інформаційних моделей на підставі даних, отриманих на експериментальних стендах;
- покращуються можливості методів чисельного моделювання в створенні аналітичних моделей гідро-аеродинамічних процесів в складних ЕСТ і їх візуалізації за рахунок застосування сучасних обчислювальних засобів і методів комп'ютерної графіки.

Практичне використання візуальних інформаційних або аналітичних моделей в сучасних САПР складних ЕСТ з одного боку дає експерту-проектувальнику нові можливості для представлення візуальних образів дослідних даних і здатне підказати нові закономірності їх

обробки, а з іншого боку призводить до накопичення значних обсягів візуальної інформації про гідро-аеродинамічні процеси. Така інформація завдяки умовам її одержання є неповною, не завжди повністю визначеною та достовірною, слабо формалізованою. Це приводить до того, що точність і надійність прийнятих рішень в САПР складних ЕСТ за допомогою аналізу візуальних даних при фізичному і чисельному моделюванні залежать від кваліфікації експерта-експериментатора і вимагають значних витрат матеріальних ресурсів.

2. Автоматизація проектування елементів систем транспортування

Для усунення означених недоліків створення і аналізу візуальних інформаційних і аналітичних моделей при фізичному і чисельному моделюванні в САПР ЕСТ зі зниженими гідравлічними опорами авторами запропоновано застосування комплексного моделювання (КМ), що використовує інструментальні засоби фізичного і чисельного моделювання в поєднанні з можливостями інтелектуального аналізу візуальних даних (ІАВД) [5]. Запропонована технологія проектування ЕСТ на основі КМ-ІАВД включає чотири етапи:

- *підготовчий* - проектування геометрії модельованого ЕСТ за допомогою одного з редакторів САПР для подальшого виготовлення вихідного шаблону. Шаблон являє собою лист каліброваного матеріалу з вирізаним каналом, моделюючим геометрію одного з перерізів ЕСТ відповідно до масштабу моделювання. Шаблон монтується в моделюючій пристрій. Типовий моделюючий пристрій складається з двох покривних плит з оптично неактивного скла, в яких вирізані вхідні і вихідні канали. Плити жорстко з'єднані між собою з допомогою кріпильного механізму, і їх товщина обирається виходячи з умов забезпечення герметичності та сталості обсягу в модельованому ЕСТ при різних робочих тисках;
- *візуальний* - візуалізація гідродинамічних процесів в моделюючому пристрої на експериментальному стенді, що виконується на основі просвічування поляризованим світлом оптично активної рідини в моделюючому пристрої. Для отримання оптично активної рідини в звичайну рідину додається 0,06% п'ятиокису ванадію при цьому її в'язкість залишається незмінною. По різниці інтенсивності освітленості в кожній точці потоку можна судити про розподіл швидкостей / тисків і про фізичної сутності гідродинамічних процесів в модельованому ЕСТ. Для отримання моделі структури потоку (зображення) візуальні картини реєструють;
- *інтелектуальний* - інтерпретація візуальної інформації про структуру гідродинамічних потоків, з метою прийняття рішень про необхідність структурних змін

(модифікації) шаблону ЕСТ для отримання результуючої геометрії;

- *експериментальний* - проектування результуючої геометрії в редакторі САПР з врахуванням реальної структури гідро-аеродинамічних потоків, одержаної на попередньому етапі, і виготовлення результуючого шаблону; випробування шаблонів на експериментальному стенді, який за допомогою пневматичної напірно-розподільчої частини забезпечує рух рідини в моделюючому пристрої з заданими гідродинамічними параметрами (об'єм і тиск). Побудова та аналіз емпіричних гідродинамічних характеристик моделей ЕСТ, синтез напівемпіричних і прогнозування теоретичних гідродинамічних характеристик ЕСТ, прийняття остаточного рішення про конструкцію каналу.

Слід відзначити, що застосування КМ-ІАВД при проектуванні складних ЕСТ дозволяє обґрунтовано приймати проектні рішення. При цьому точність і надійність прийнятих рішень визначається якістю інтелектуального аналізу візуальних даних. Це дозволить автоматизувати процес проектування ППК, зробити його менш залежним від кваліфікації експерта-експериментатора, а також значно знизити матеріальні і часові ресурси необхідні для виконання проектних робіт.

3. Інтелектуальний аналіз візуальних даних в САПР елементів системи транспортування

Розглянемо особливості інтелектуального аналізу візуальних даних на основі КМ-ІАВД при проектуванні одного із популярних з'єднувальних елементів - повороту потоку на 90° типу «коліно» (ППК) зі знизеним гідравлічним опором.

На *підготовчому етапі* в редакторі AutoCAD проектується ескізне креслення ППК, на підставі якого виготовлено шаблон ППК та вмонтовано в моделюючий пристрій необхідного типу. Попередні випробування цього шаблону ППК на стенді моделювання показали, що значення гідравлічного опору ζ складає 1,2, а коефіцієнта витрати (гідравлічної ефективності) η - 0,68.

На *візуалізаційному етапі* проводиться візуалізація гідродинамічних потоків в моделюючому пристрої на експериментальному стенді, яка дозволяє отримати картину розподілів швидкостей / тисків (рис. 1, а). При цьому на зображенні ППК можна визначити зони відриву потоку від стінки каналу Z – дисипативні гідродинамічні структури (ГС) і упорядковані шари потоку – шаруваті ГС – 1, 2. Згідно з висновком експерта - проектувальника дисипативні ГС є джерелами максимальних місцевих гідравлічних опорів ($\zeta = 1,2$), які перешкоджають організованому руху потоку, та приводять до зниження гідравлічної ефективності ППК ($\eta = 0,68$).

Інтелектуальний аналіз візуальних даних - картин розподілу швидкостей / тиску дозволяє визначити на зображенні дисипативні і шаруваті ГС і виробити рекомендації з проектування результуючої геометрії ППК, який проектується. Інтелектуальний аналіз зображень гідродинамічних потоків передбачає виконання процедур попередньої обробки, морфологічного аналізу та інтелектуальної візуалізації для відображення структури потоку. Інтелектуальна візуалізація в свою чергу потребує створення топологічно впорядкованих карт ознак, які притаманні ГС для подальшої сегментації

зображень гідродинамічних потоків, а також ідентифікації та класифікації ГС.

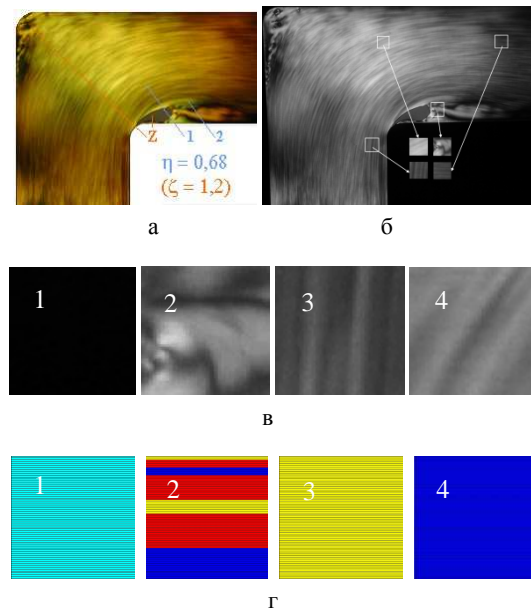


Рис. 1 Зображення гідродинамічного потоку в шаблоні ППК: а – вхідне, б – після попередньої обробки, в – основні типи ГСП після морфологічного аналізу, г – основні типи ГСП після відображення у вихідний простір

Для скорочення обсягу аналізованої інформації в ході процедури *попередньої обробки* виконується конвертація кольорового зображення в півтонове з одночасною пороговою обробкою (поріг «знизу» - див. рис. 1, б):

$$\text{Gray}_{ij} = \alpha(a^r R_{ij} + a^g G_{ij} + a^b B_{ij})$$

де α , a^r , a^g , a^b – експериментально обрані коефіцієнти, які визначаються параметрами моделюючого пристрою.

Метою *морфологічного аналізу* є визначення найбільш характерних структурних примітивів. При цьому на зображенні гідродинамічного потоку в шаблоні ППК на основі властивостей однорідності, впорядкованості і спрямованості виділяються елементарні, непохідні елементи – гідродинамічні структурні примітиви (ГСП), розміри яких узгоджені з роздільною здатністю фотореєструючої апаратури і забезпечують псевдостационарність зображень ГСП. Запропоновано наступна класифікація основних морфологічних типів (рис. 1, в):

– ГСП «стінка» (зона 1) – нерухоме однорідне поле на зображенні гідродинамічного потоку, що відповідає оптично неактивному каліброваному матеріалу шаблону моделювання;

– ГСП «потік» – оптично неоднорідна частина зображення, яка характеризує зміну величини пульсаційної складової швидкості в полі потоку.

– «дисипативні ГСП» (зона 2) – неупорядковані частини зображення ГСП «потік»;

– «шаруваті ГСП» – впорядковані частини зображення ГСП «потік». Шаруваті ГСП являють собою сімейство смуг (шарів) потоку, що чергуються. Шаруваті ГСП

поділяються в залежності кута відхилення спрямованих смуг від напрямку стінки каналу на «прямі» (зона 3) і «орієнтовані» (зона 4).

Для реалізації процедур *інтелектуальної візуалізації*, пропонується використовувати нейромережевий підхід, заснований на застосуванні самоорганізованих карт Кохонена (self-organizing map – SOM). SOM відноситься до нейронних мереж з прямою передачею даних і має вхідний і вихідний шари. Вхідний шар, розмірність якого відповідає розмірності вихідних даних, називається рецепторним. Вихідний обчислювальний шар (шар Кохонена) містить нейрони, кожен з яких пов'язаний з нейроном рецепторного (вхідного) шару прямими зв'язками, а з усіма іншими латеральними зв'язками [6]. Найбільш часто SOM мають одномірну (1D) або двовимірну (2D) топологію в залежності від розташування нейронів в рецепторному або обчислювальному шарах. При цьому нейрони обчислювального шару можуть становити гексагональну або прямокутну решітку. Якщо нейрони розташовані в кутах прямокутної решітки, тоді між ними можливі тільки вертикальні і горизонтальні латеральні зв'язки, а якщо в кутах гексагональної решітки тоді – вертикальні і діагональні зв'язки.

За основу при створенні топологічно впорядкованої карти ознак морфологічно виділених ГСП взято одномірну топологію SOM, де рецепторний шар складається зі 64 нейронів, а обчислювальний із 4 нейронів. Всі нейрони обчислювального шару мають конкуруючу функцію активації, утворюють зі всіма нейронами рецепторного шару прямі зв'язки, а між собою – вертикальні латеральні зв'язки (рис. 2).

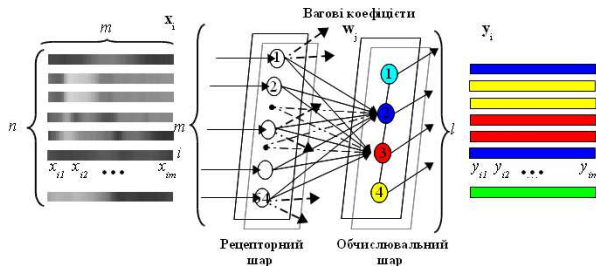


Рис.2 Модель відображення ознак гідродинамічних структурних примітивів

Метою процедури *створення SOM* є отримання векторів статистичних ознак, завдяки яким можливо відображення найбільш характерних вхідних півтонових ГСП в вихідний простір, який відповідає чотирьом класам ГСП. Вихідний простір відображається за допомогою чотирьох псевдоколіорів. Процедура відображення вхідних характерних ГСП в вихідний простір реалізована наступним чином. На вхід рецепторного шару SOM послідовно подаються підобласті x_i вхідного простору X . При цьому вхідний простір X сформовано із зображень еталонних представників півтонових ГСП кожного із морфологічних типів (див. рис. 1,в), а підобласть x_i формується у вигляді вектору-рядку з вхідного простору. Внаслідок конкурентної самоорганізації вагові коефіцієнти нейронів обчислювального шару адаптуються так, щоб максимальним чином реагувати на схожі послідовності даних з підобластей x_i вхідного простору X і мінімальним на послідовності, що відрізняються.

Результатом самоорганізації є матриця W адаптованих вагових коефіцієнтів прямих зв'язків нейронів обчислювального шару, яка складає простір ознак (рис. 2). Кожен вектор-рядок w_j простору ознак налаштований на відповідне відображення даних з вхідного простору X у вихідний простір Y . Таким чином формується простір ознак, який дозволяє визначити схожі морфологічні типи ГСП.

Метою процедури *сегментації* є розділення зображення гідродинамічного потоку в шаблоні ППК на області, що відповідають основним типам ГСП. Процедура сегментації зображення гідродинамічного потоку в шаблоні ППК на основі сформованої SOM реалізована як послідовна горизонтальна та вертикальна обробка. Вхідне зображення гідродинамічного потоку (рис.3,а) «горизонтально» трансформується в вхідний простір X . Підобласті x_i простору X послідовно подаються на вхід рецепторного шару SOM і у відповідності з матрицею ознак W обчислювального шару відображаються в підобласті y_i вихідного простору Y (рис.2):

$$k(y) = \arg \min_j \|x - w_j\|$$

де k – індекс нейрона-переможця обчислювального шару. Вихідний простір Y відображається в «горизонтально» сегментоване Y^H вихідне зображення гідродинамічного потоку (рис. 3,а), яке представляється за допомогою чотирьох псевдоколіорів. Аналогічно виконується вертикальна обробка в результаті якої формується «вертикально» сегментоване Y^V вихідне зображення гідродинамічного потоку (рис. 3,б). Для отримання «загально» сегментованого Y^C зображення гідродинамічного потоку (рис. 3,в) виконується логічне попіксельне об'єднання горизонтально і вертикально сегментованих зображень:

$$y_{ij}^C = \begin{cases} y_{ij}^H, & \text{якщо } y_{ij}^H = y_{ij}^V \\ 255, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (1),$$

де y_{ij} – окремий піксель зображення.

Необхідно зазначити, що при формуванні сегментованого зображення гідродинамічного потоку в шаблоні ППК кількість пікселів, при об'єднанні яких не виконувалась умова (1), становить 14,16% від загальної кількості пікселів.

Дослідження показали, що використання одномірних SOM для інтелектуальний аналіз візуальних даних на основі статистичних характеристик інтенсивності дозволяє:

- на основі морфологічно виділених основних типів ГСП завдяки конкурентній самоорганізації сформувати простір ознак, який відображає вхідні дані у вихідний простір зі значно меншої кількістю градацій інтенсивності (4 псевдоколіори).
- на основі сформованого простору ознак отримати візуальні сегментовані зображення гідродинамічних потоків, що одержані в шаблоні ППК. використання яких при прийнятті проектних рішень скорочує об'єми аналізованих даних.

Однак застосування одномірних SOM на основі статистичних характеристик інтенсивності не дозволяє врахувати взаємне розташування пікселів на зображенні ГСП. Використання частково двовимірних (2D–рецепторний і 1D–обчислювальний шари) і повністю

двовимірних SOM на основі конкурентної самоорганізації дозволяє побудувати топологічні моделі просторово-статистичних ознак, і на базі них покращити ідентифікацію основних типів ГСП на зображеннях гідродинамічних потоків в ЕСТ.

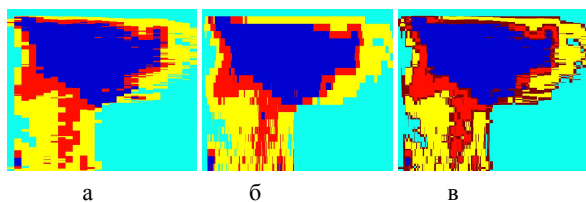


Рис.3 Сегментовані зображення гідродинамічного потоку в шаблоні ППК: а –«горизонтально», б – «вертикально», в – «загально»

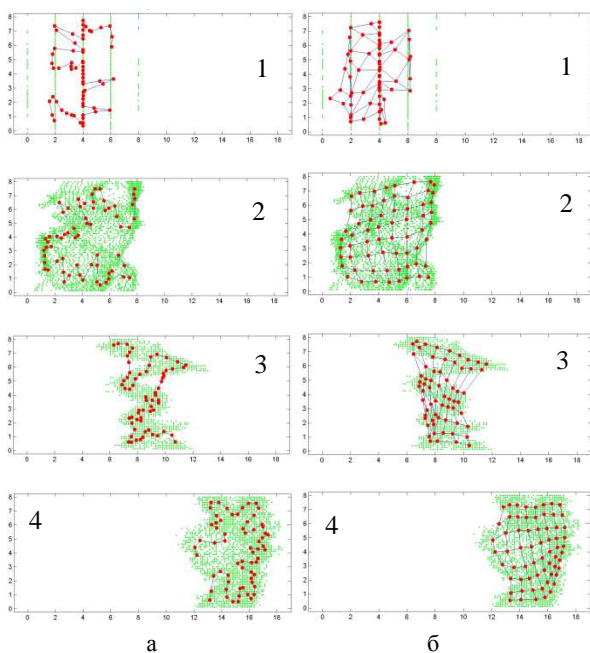


Рис. 1 Зображення розподілень вхідних векторів (позначено зеленим кольором) і векторів ознак (червоним) основних типів ГСП: а – для 1D-обчислювального шару, б – для 2D.

Таким чином, на основі проведеного інтелектуального аналізу приймається рішення про характер структури гідродинамічних потоків в моделі ППК, про наявність дисипативних зон і зон відриву гідродинамічного потоку від стінок каналу і формується модель структурних змін шаблону (рис.3, а).

На експериментальному етапі на основі отриманої моделі структурних змін шаблону в редакторі AutoCAD виконується проектування результуючої геометрії ППК (рис. 3, б). Для забезпечення безвідривної течії зони дисипативних ГСП в результуючому шаблоні ППК замінюються вставками лекалами. Порівняльні випробування вихідного і результуючого шаблонів на стенді моделювання показали зниження величини місцевого гідравлічного опору ζ з 1,2 до 0,23 і

підвищення гідравлічної ефективності η з 0,68 до 0,901 в моделях ППК.

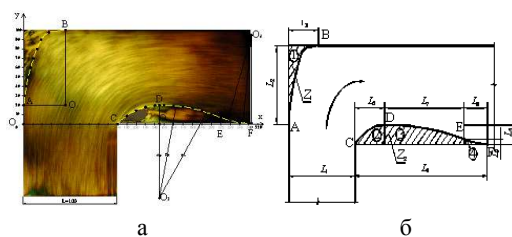


Рис 3 Результати одержані на експериментальному етапі проектування ППК на основі КМ-ІАВД

4. Висновок

Таким чином, експериментальні дослідження показали, що застосування запропонованої технології проектування ЕСТ на основі КМ-ІАВД при побудові геометрії повороту потоку на 90° типу «коліно» зі знизеним гідравлічним опором має вагомні переваги, оскільки проектне рішення приймається на основі інформації статистично-просторові характеристики гідродинамічного потоку. Впровадження технології КМ-ІАВД дозволить автоматизувати процес проектування ЕСТ складної форми, таких як: колектори, повороти, трійники, раптові розширення або звуження і т. п., і знизити їх гідравлічні опори від 10 до 40% і, отже, знизити енерговитрати при експлуатації систем транспортування рідин або газів.

5. Перелік посилань

- [1] Идельчик И.Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям.* / Под ред. М.О. Штейнберга.– 3-е изд.– М.: Машиностроение, 1992. – 672 С., ил
- [2] Берже П., Помо И., Видаль К. *Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности.* М.: Мир. – 1991. С– 368.
- [3] *Вихри и волны* / Под ред. Иллинского Ю.А., Черного Г.Г. *Новое в зарубежной науке. Механика.* М.: Мир. – 1984. С– 110.
- [4] Арсирий В.А. *Повышение эффективности оборудования с использованием FST-технологии* // *Тр. Одес. Политехн. ун-та. — Одесса, 2003. Вып. 2. С. 187 — 191*
- [5] Арсирий Е. А. *Интеллектуальный анализ при комплексном моделировании для повышения надежности работы энергетического оборудования* / Е.А.Арсирий, С.Г.Антощук, В.А. Арсирий, В.И. Кравченко // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи.* – 2012. – № 6(58). – С. 89-94.
- [6] Кохонен Т. *Самоорганизующиеся карты* / Т. Кохонен; пер. 3-го англ. изд. — М. : БИНОМ Лаборатория знаний, 2008. — 655с. ил.