

УДК 004.519.217

# РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОАЭРО- ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СРЕДСТВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Е. А. Арсирій

Кандидат технических наук, доцент

Кафедра информационных управляющих систем и технологий

Одесский национальный политехнический университет

пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

E-mail: arsiriy@te.net.ua

*Розроблено засоби інтелектуальної візуалізації при отриманні візуальних та інтелектуальних моделей гідродинамічних структурних примітивів і елементів гідроаеродинамічних систем. Розроблені інтелектуальні моделі елементів гідроаеродинамічних систем відрізняються інформаційною повнотою і урахуванням логічної структури і дозволяють синтезувати структурні моделі елементів із зниженими гідроаеродинамічними опорами*

*Ключові слова: інформаційні технології, інтелектуальний аналіз даних, моделювання гідроаеродинаміки, експлуатація гідроаеродинамічних систем*

*Разработаны средства интеллектуальной визуализации при получении визуальных и интеллектуальных моделей гидродинамических структурных примитивов и элементов гидроаэродинамических систем. Разработанные интеллектуальные модели элементов гидроаэродинамических систем отличаются информационной полнотой и учетом логической структуры и позволяют синтезировать структурные модели элементов с пониженными гидроаэродинамическими сопротивлениями*

*Ключевые слова: информационные технологии, интеллектуальный анализ данных, моделирование гидроаэродинамики, эксплуатация гидроаэродинамических систем*

## 1. Введение

Анализ украинских энергетических объектов, магистральных и разветвленных сетей со сложными гидроаэродинамическими элементами показывает, что около 50% оборудования физически и морально устарело и по основным показателям, определяющим эффективность (производительность, энергетические затраты, эффективность управления, экологические показатели), не соответствует мировым требованиям. Поэтому актуальным является переоснащение гидроаэродинамических систем (ГАДС) без разрушения существующих конструкций за счет интенсификации энергетических процессов [1].

Опыт переоснащения ГАДС показывает, что одним из эффективным путей интенсификации энергетических процессов является снижение сопротивлений в элементах ГАДС, таких как коллекторы, повороты, тройники и др. Анализ работ исследователей в этой области показывает, что снижение гидравлических сопротивлений возможно только при учете реальной структуры гидроаэродинамических потоков [2]. Для получения такой информации применяются методы физического и численного моделирования и анализа

гидроаэродинамических потоков в сложных элементах ГАДС. Однако их применение в этом случае не дает полной информации о структуре гидродинамических потоков. При этом точность, надежность и оперативность принимаемых решений для снижения гидравлических сопротивлений в сложных зависит от квалификации эксперта-экспериментатора и требует значительных затрат ресурсов [3-5]. Для устранения перечисленных недостатков предложено дополнить физическое и численное моделирование возможностями интеллектуального анализа визуальных данных (ИАВД) о структуре потока.

## 2. Визуальные и интеллектуальные модели элементов гидроаэродинамических систем

Для выявления и исследования влияния гидроаэродинамических процессов на гидравлические сопротивления в элементах сложной формы разработаны средства комплексного моделирования, которые позволяют получить *визуальные и интеллектуальные модели* [6, 7]. Предложено для описания структуры потока ввести следующие понятия.

*Определение 1.* Визуальной моделью VME основного или вспомогательного элемента ГАДС будем называть изображение в виде распределения оптической плотности, которое однозначно характеризует поле градиентов скоростей (давлений) гидродинамического потока в моделируемом элементе.

*Определение 2.* Визуальной моделью VMP гидродинамического структурного примитива (ГСП) будем называть элементарный, неприводимый фрагмент изображения VME размер которого обеспечивает псевдостационарность и согласован с разрешающей способностью средств регистрации комплексного моделирования

*Определение 3.* Интеллектуальной моделью IME основного или вспомогательного элемента ГАДС будем называть упорядоченное объединение ГСП:

$$IME = [RE] \bigcup_{i=1}^n VMP_i, \quad (1)$$

где  $n$  – количество VMP;  $[RE] \bigcup$  – контекстно-зависимые продукции объединения VMP.

*Определение 4.* Интеллектуальной моделью ГСП будем называть выражение логико-аналитическом виде:

$$IMHSP = \langle Id_k, VMP_k, F_k, K \rangle, \quad (2)$$

где  $Id_k$  – идентификатор;  $F_k$  – набор признаков;  $K$  – номер класса.

Набор признаков можно представить кортежем:

$$F = \langle F_{sta}, F_{spe}, F_{str}, F_{str-spe} \rangle, \quad (3)$$

где  $F_{sta}$  – множество статистических признаков;  $F_{spe}$  – множество спектральных признаков;  $F_{str}$  – множество структурных признаков;  $F_{str-spe}$  – множество структурно-спектральных признаков.

### 3. Средства получения интеллектуальных моделей

Для получения IMHSP в массиве реализаций гидроаэродинамических потоков в основных и вспомогательных элементах ГАДС осуществлялся поиск закономерностей для более компактного описания данных согласно следующим четырем этапам:

- составление априорного алфавита классов  $K$  на основе процедуры кластеризации;
- составление априорного словаря признаков  $F$ ;
- реализация алгоритма классификации;
- уточнение описания всех классов на языке признаков с учетом показателя качества классификации.

*Этап 1.* При определении классов-прототипов  $K$  в (3) предложено проводить кластеризацию визуальных данных на основе метода интеллектуальной визуализации (МИВ) с помощью самоорганизующихся карт Кохонена (SOM) в виде когерентных областей (coherent region) (SOM-CR).

МИВ SOM-CR реализован в виде двух процедур: классической самоорганизации и модифицированной градуировки (рис. 1). При выполнении процедуры самоорганизации векторы  $VMP_k$  выбираются случайным образом из изображения гидроаэродинамического потока (рис. 1, а) в элементе VME и подаются на вход SOM. Предварительные исследования показали, что целесообразно использовать SOM с нейронами в узлах прямоугольной решетки размером  $10 \times 10$  (рис. 1, б). Затем проводится адаптация весовых коэффициентов SOM. Процедура самоорганизации повторяется итеративно до получения стационарного состояния SOM [8].

При выполнении процедуры градуировки для визуализации когерентной карты предложено не только маркировать нейроны в соответствии с функцией подобию элементам  $VMP_i$  (рис. 1, в), но и фиксировать также количество (рис. 1, г) и вид подобных элементов VMP (рис. 1, д). Это дает возможность учитывать «родственные» взаимосвязи между элементами одного класса (рис. 1, д).

На основании полученной когерентной карты сделан вывод о наличии двух полярных ГСП – оптически неактивных (стенка -  $K4$ ) и активных (поток). Причем оптически активные ГСП могут быть двух типов – неупорядоченные – диссипативные ( $K3$ ) и упорядоченные, которые также подразделяются на прямые ( $K1$ ) и ориентированные ( $K2$ ) ГСП (табл. 1). Таким образом, сформирован априорный алфавит классов и обучающая выборка гидродинамических структурных примитивов.

Использование МИВ SOM-CR при составлении априорного алфавита классов и обучающей выборки позволило исключить субъективность эксперта и повысить достоверность кластеризации 15% по сравнению с аналогами [3].

*Этап 2.* Поскольку при анализе обучающей выборки ГСП установлен квазистационарный и слабоструктурированный характер данных, поэтому предложено использовать при классификации признаки в исходном и признаковом пространствах. Для извлечения наилучшего набора статистических  $F_{sta}$  признаков в исходном пространстве применялась дискретная аппроксимация – главных кривых или главных поверхностей на основе одно и двумерных топологических карт Кохонена (табл. 1). Полученную информацию предложено учитывать на последующем этапе при инициализации классификатора.

Использование МИВ SOM-CR при составлении априорного алфавита классов и обучающей выборки позволило повысить достоверность кластеризации 15% по сравнению с аналогами.

*Этап 2.* Анализ обучающей выборки показал квазистационарный и слабоструктурированный характер данных, поэтому проведен анализ признаков в исходном и признаковом пространствах. Для извлечения наилучшего набора статистических  $F_{sta}$  признаков в исходном пространстве применялась дискретная аппроксимация – главных кривых или главных поверхностей на основе одно и двумерных топологических карт Кохонена (табл. 1). Полученную информацию предложено учитывать на последующем этапе при инициализации классификатора.

Проведенный анализ признаковых пространств показал, что рациональными являются аналитические

описания топосечений амплитудных Фурье-спектров (табл. 1): коэффициент формы  $K=4\pi S/P^2$  и аспект  $As = \omega_{\min} / \omega_{\max}$ .

Здесь  $\omega_{\min}$  и  $\omega_{\max}$  — минимальный и максимальный радиусы связных областей;  $S$ ,  $P$  — площадь и периметр связной области.

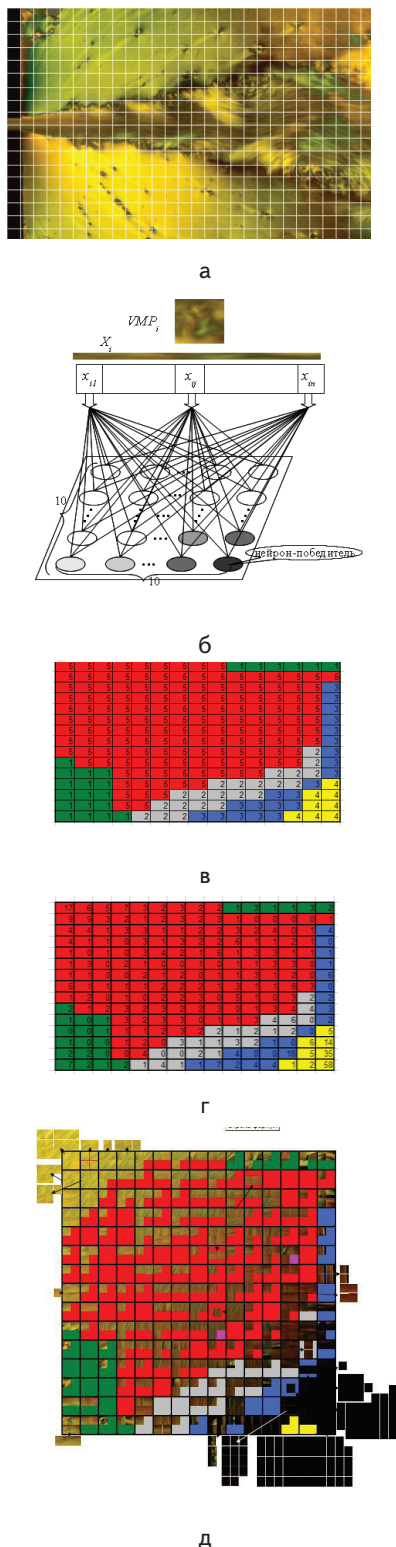


Рис. 1. Кластеризация на основе когерентной SOM: а — структура гидроаэродинамического потока в участке трубы со скачкообразным расширением; б — этап самоорганизации; в, г, д — визуализация когерентной SOM

*Этап 3.* Классификация ГСП предполагает их отнесение к классам в соответствии с табл. 1. Анализ полученного признакового пространства показал, что кластеры распределения выбранных интегральных параметров ГСП разного типа пересекаются, т. е. гипотеза компактности не соблюдается. Для построения разделяющих поверхностей предложено использовать многослойный перцептрон (multilayer perceptron — MLP), обучаемый на основе метода обратного распространения (back-propagation learning — BPL).

Для учета квазистационарного характера исходных данных предложено проводить настройку параметров BPL с целью повышения эффективности (увеличения скорости и снижения среднеквадратической ошибки) обучения MLP при классификации ГСП. Предложено модифицировать метод пакетного обучения по алгоритму градиентного спуска на основе методики настройки вида активационной функции нейрона (АФН) и скорости обучения. Использовалась обучающая выборка, состоящая из  $N=42$  образцов ГСП, полученная на этапе 1.

Корректировка весовых коэффициентов  $\Delta w_{ij}(n)$  MLP проводится с учетом направления антиградиента при пакетном обучении формула [9]:

$$\Delta w_{ij}(n) = \frac{\eta}{N} \sum_{p=1}^N \delta_j(n) \cdot y_i(n), \tag{4}$$

где  $\eta$  — скорость обучения;  $y_i(n)$  — входной сигнал нейрона  $j$ ;  $\delta_j(n)$  — локальный градиент.

$$\delta_j = \begin{cases} e_j \cdot \phi'_j(v_j(n)), j\text{-выходной нейрон} \\ \phi'_j(v_j(n)) \sum_k \delta_k(n) w_{kj}(n), j\text{-скрытый нейрон.} \end{cases} \tag{5}$$

Предложено для обеспечения приемлемого соотношения среднеквадратической ошибки и скорости обучения при классификации ГСП изменять скорость обучения  $\eta$  алгоритма градиентного спуска (GDA) при пакетном обучении и использовать настройку угла наклона АФН MLP:  $\log \text{sig}(n) = 1 / (1 + e^{-\alpha n})$ , где  $\alpha$  — параметр наклона (slope parameter) логистической функции. Критерием выбора является снижение «блуждания» по поверхности ошибки [4].

*Этап 4.* Проведено уточнение описания всех классов на языке признаков с учетом показателя качества классификации. Предложено слоистые прямые « $L_d$ » и ориентированные « $L_o$ » ГСП объединить в один класс « $L$ ». Проведенные эксперименты показали, что достоверность классификации в этом случае повышается на 7-12%.

Для получения интеллектуальной модели элементов ГАДС ИМЕ (2) предложено процедуру, состоящую из трех этапов:

- дискретизация изображения гидродинамического потока на ГСП;
- извлечение спектральных признаков  $F_{\text{str-spe}}$  ГСП и их классификация;
- морфологическая обработка результата и получение модели ИМЕ.

Изменяя размеры ГСП от 8 до 256 возможно определить влияние нестационарности потока на точность (устойчивость) оценки статистических и спектральных признаков. Показано, что при выбранном наборе признаков размер элемента может составлять от 16 до 64 без существенной потери качества распознавания.

Фрагмент базы гидродинамических структурных примитивов

Id <sub>k</sub> , K	Описание	VMP <sub>k</sub>	F <sub>sta</sub>	F <sub>str-spe</sub>
слоистые прямые L <sub>d</sub> K=1	Оптически активная область Упорядоченно-прямая часть			
слоистые ориентированные L <sub>o</sub> K=2	Оптически активная область Упорядоченно-ориентир. часть			
Диссипативные D K=3	Неупорядоченные части области оптически активной жидкости			
Стенка S K=4	Оптически неактивная область			

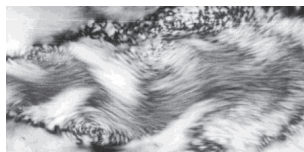
Целью морфологической обработки является объединение ГСП согласно правил RE в (1). Предложен следующий морфологический оператор для связывания и маркировки элементов изображений:

$$VME_k = \begin{cases} VMP^s, & \text{if } VME_{k-1} \cap VMP^s \neq \emptyset \wedge ((VME_{k+1} \cap VMP^s \neq \emptyset \vee VME_{k+1} \cap VMP^d \neq \emptyset)) \\ VMP^d, & \text{if } VME_{k-1} \cap VMP^d \neq \emptyset \wedge ((VME_{k+1} \cap VMP^d \neq \emptyset \vee VME_{k+1} \cap VMP^l \neq \emptyset)) \\ VMP^l, & \text{if } VME_{k-1} \cap VMP^l \neq \emptyset \wedge ((VME_{k+1} \cap VMP^l \neq \emptyset \vee VME_{k+1} \cap VMP^d \neq \emptyset)) \end{cases}, \quad (6)$$

где VME<sub>k</sub> – k-тый элемент визуальной модели; VMP<sup>s</sup>, VMP<sup>d</sup>, VMP<sup>l</sup> – изображения ГСП соответствующих типов.

Результаты формирования интеллектуальной модели элемента ГАДС ИМЕ приведены на рис. 2.

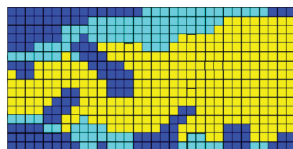
Разработанные процедуры программно реализованы и являются средствами ИАВД.



а



б



в

Рис. 2. Формирование интеллектуальной модели гидроаэродинамического потока в участке трубы со скачкообразным расширением: а – фрагмент исходного изображения; б – после этапа 2; в – после этапа 3

#### 4. Выводы

Исследования показали, что использование средств ИАВД позволило разработать:

- интеллектуальную модель ГПС, которая отличается информационной полнотой и создать базу гидродинамических структурных примитивов;
- интеллектуальную модель элементов ГАДС, которая отличающаяся учетом логической структуры и синтезировать структурные модели элементов с пониженными гидроаэродинамическими сопротивлениями.

Экспериментальная проверка показала, что для элемента ГАДС – поворот потока на 90° гидравлическое сопротивление ζ было снижено с 1,2 до 0,23 при Re≈10<sup>5</sup> [10]. При этом снижен шум, движущегося потока жидкости в повороте, с 45 до 21 дБ при скорости V = 20 м/с.

#### Литература

1. Арсирый, В.А. Повышение эффективности оборудования с использованием FST-технологии [Текст] / В.А. Арсирый // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса: – 2003. – Вып. 2. – С. 187–191.
2. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. [Текст] / И.Е. Идельчик; под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с., ил
3. Берже, П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности [Текст] / П. Берже, И. Помо, К. Виталь. – М.: Мир. – 1991. – 368с.
4. Ишлинский, Ю.А. Вихри и волны [Текст] / Под ред. Ю.А. Ишлинского, Г.Г. Черного // Новое в зарубежной науке. Механика. – М.: Мир. – 1984. – 110 с.

5. Кантуэлл, Б.Дж. Организованные движения в турбулентных потоках. [Текст] : Пер. с англ. // Сб. статей. Вихри и волны. – М.: Мир. – 1984. – С. 9-79.
6. Arsiriy, E. Reduction of Noise and Vibration of Turbo Machinery due to Improvement of Flowing Part [Text] / E. Arsiriy, V. Arsiry // International Symposium on Compressor & Turbine Flow Systems – Theory & Application Areas “SYMKOM’08”. – Institute of Turbomachinery Technical University of Lodz, Lodz. – 15-17 September, 2008
7. Arsiriy, E. The physical method of visual diagnostics of flow structure [Text] / E. Arsiriy, V. Arsiry // XII International Scientific Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering. Rzeszow-Lviv-Kosice. – 17-19 September 2009. – Rzeszow, Poland. – Z.54, N266. – pp. 5-8
8. Кохонен, Т. Самоорганизующиеся карты [Текст] : пер. 3-го англ. изд. / Т. Кохонен. – М. : БИНОМ Лаборатория знаний, 2008. – 655с., ил
9. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс [Текст] : 2-е изд., испр., пер. с англ. / Под ред. Н.Н. Куссуль, С. Хайкин // М.: ООО “И.Д. Вильямс”. – 2006. – С. 1104.
10. Арсирий, Е. А. Интеллектуальный анализ при комплексном моделировании для повышения надежности работы энергетического оборудования [Текст] / Е. А. Арсирий, С. Г. Антощук, В. А. Арсирий, В. И. Кравченко // Радіоелектронні і комп’ютерні системи. – 2012. – № 6(58). – С. 89–94.

*В контексті загальної проблеми підвищення енергоефективності виробництв аміаку представлені результати досліджень та розробок, спрямованих на зниження енергоємності відділення синтезу за рахунок застосування у блоках конденсації пароежекторних холодильних систем, утилізуючих низькопотенціальну теплоту матеріальних потоків з рівнем температур менше 100°С*

*Ключові слова: виробництво аміаку, енергоефективність, утилізація теплоти, пароежекторні холодильні системи*

*В контексте общей проблемы повышения энергоэффективности производств аммиака представлены результаты исследований и разработок, направленных на снижение энергоёмкости отделения синтеза за счет применения в блоках конденсации пароежекторных холодильных систем, утилизирующих низкопотенциальную теплоту материальных потоков с уровнем температур менее 100°С*

*Ключевые слова: производство аммиака, энергоэффективность, утилизация теплоты, пароежекторные холодильные системы*

УДК 661.53:66.042.2

# ПАРОЭЖЕКТОРНЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ЭНЕРГО- СБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПРОИЗВОДСТВА АММИАКА

**А. К. Бабиченко**

Кандидат технических наук, профессор  
Кафедра автоматизации химико-технологических систем и экологического мониторинга  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002  
E-mail: svetkrasnikova@yandex.ua

## 1. Введение

По объему производства аммиак занимает одно из первых мест в химической промышленности, основное направление использования которого связано с получением азотсодержащих минеральных удобрений. За счет внесения этих удобрений в почву обеспечивается повышение урожайности сельскохозяйственных культур в среднем на 35 % [1], что обусловило непрерывный рост мировых мощностей по производству аммиака, которое за период 2008 – 2011 г.г. увеличилось на 11 % и достигло уровня 200 млн.т. [2]. В Украине даже в наилучшие годы (1990 г.) показатель внесения этих удобрений был значительно

ниже (140÷160 кг/га), чем в странах с интенсивным земледелием (200÷400 кг/га) [3]. Учитывая последнее и значительное количество пахотных земель аммиак и удобрения для Украины всегда будут стратегическим товаром, определяющим экономическую безопасность страны.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

По данным аналитическо-консультативного совета по вопросам экономики Верховного Совета Украины биологическая потребность пахотных земель в